

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE FILOSOFÍA

Departamento de Filosofía I



**ESPISTEMOLOGÍA, ONTOLOGÍA Y
COMPLEMENTARIEDAD EN NIELS BOHR**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

Yolanda Cadenas Gómez

Bajo la dirección de la doctora

Ana Rioja Nieto

Madrid, 2004

ISBN: 84-669-2538-4

*EPISTEMOLOGÍA, ONTOLOGÍA
Y COMPLEMENTARIEDAD EN
NIELS BOHR*

Tesis doctoral presentada por:

YOLANDA CADENAS GÓMEZ

DIRIGIDA POR:

Dra. Dña. Ana Ríoja

DEPARTAMENTO DE FILOSOFÍA I

FACULTAD DE FILOSOFÍA

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE

MADRID, 2003

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
I- EL IDEAL CLÁSICO DE DESCRIPCIÓN DE LA NATURALEZA	9
1.1) Los Objetivos Mecanicistas y la Conceptualización de la Física Clásica	10
a) El ideal realista de la ciencia moderna y su modelo de inteligibilidad.....	11
b) Atomismo y geometrización de la materia.....	16
c) La evolución dinámica de los sistemas físicos y el modelo de continuidad electromagnética.....	20
1.2) Los Postulados del Marco Clásico para la Descripción Física	25
a) La continuidad de las conexiones causales en la Naturaleza.....	27
b) La independencia entre las propiedades geométricas y las propiedades dinámicas.....	32
c) El representacionismo pictórico.....	36
d) El postulado del isomorfismo entre los niveles físicos.....	40
e) Conclusión. Los ideales descriptivos de la física clásica.....	42
II- APUNTES HISTÓRICOS SOBRE EL ORIGEN DE LA FÍSICA CUÁNTICA	45
2.1) Tres Momentos en la Evolución del Cuanto	46
a) La hipótesis de Planck: el cuanto de energía.....	47
b) La teoría fotónica de Einstein: el cuanto de luz.....	54
c) La teoría atómica de 1913: el postulado cuántico de Bohr.....	59
d) El significado conceptual del cuanto de acción.....	66
2.2) La Dualidad Onda-Corpúsculo: Materia y Radiación	71
a) Las ondas luminosas y los fotones.....	72
b) Tesis de de Broglie: partículas y ondas materiales.....	75
c) La difracción del electrón: “Experimento de la Doble Rendija”.....	79
d) La continuidad del campo electromagnético y la continuidad electrodinámica y mecánica.....	87

2.3) El Formalismo Matemático de la Teoría Cuántica.....	91
a) El principio de correspondencia de la “primera teoría atómica” de Bohr.....	91
b) El álgebra no-conmutativa de la mecánica matricial.....	94
c) La mecánica ondulatoria y el colapso de Ψ	97
d) El “contenido intuitivo” del formalismo cuántico.....	103
e) Conclusión. La naturaleza y el carácter realista del <i>cuanto universal de acción</i>	108
III- EL CONFLICTO CON LA FÍSICA CLÁSICA.....	117
3.1) Los Problemas Epistemológicos del Formalismo Cuántico.....	117
a)La repercusión de la presencia de h en los formalismos de la mecánica cuántica.....	119
b)El fracaso de la descripción física como representación pictórica.....	127
c)La ruptura de la descripción causal y espacio-temporal: renuncia al ideal determinista.....	135
d)El problema de la medida: la mediatización de la interacción observacional en la descripción objetiva.....	138
3.2) Las Condiciones Epistemológicas de la Descripción Cuántica.....	144
a)Inseparabilidad sujeto-objeto y discontinuidad cuántica en la descripción física.....	145
b)Imprescindibilidad de las nociones clásicas: uso de los conceptos descriptivos.....	151
c)Segunda versión del principio de correspondencia.....	155
d)Conclusión. El camino hacia la complementariedad.....	159
IV- BOHR: LA FILOSOFÍA DE LA COMPLEMENTARIEDAD Y SU “LECCIÓN EPISTEMOLÓGICA”.....	165
4.1) Las Dos Formulaciones de la Complementariedad.....	165
a)El significado de la complementariedad como el nuevo marco conceptual.....	166
b)Los dos componentes básicos de la noción de complementariedad.....	170
c)Complementariedad de las imágenes de onda y de corpúsculo.....	173
d)Complementariedad de los conceptos cinemáticos y dinámicos: el principio de indeterminación como su expresión cuantitativa.....	183

4.2) Los Componentes de la “Lección Epistemológica”	193
a) Primer elemento: “marcos conceptuales revisables”	194
b) Segundo elemento: “intuición y representabilidad simbólica del lenguaje físico”	197
c) Tercer elemento: “inambigüedad de la información”	200
d) Cuarto elemento: “unidad del conocimiento humano”	202
4.3) La Tarea Epistemológica de Bohr	208
a) Ampliación del nuevo marco conceptual	209
b) Su fenomenismo como punto de partida: teoría de la medida y noción de observación y de fenómeno	215
c) La tesis semántica de Bohr	224
4.4) Interludio Filosófico	230
a) La empresa de Bohr frente a la empresa kantiana: su interpretación del formalismo como una empresa no-transcendental	231
b) Objeciones del “realismo clásico” a la complementariedad: apuntes sobre Einstein	235
c) Recapitulaciones sobre el marco cuántico: teoría e interpretación	238
d) Conclusión. La mecánica como estudio de la materia en movimiento	254
V- EINSTEIN: UNA RÉPLICA A BOHR	263
5.1) El Argumento EPR: ¿Por Qué es Incompleta la Mecánica Cuántica?	264
a) Los dos Congresos Solvay	266
b) El artículo EPR: 1935	274
c) La descripción física bajo el criterio de realidad	282
d) La localidad: requisito del criterio de realidad	298
5.2) La Respuesta de Bohr: ¿Por Qué es Completa la Mecánica Cuántica?	309
a) Los argumentos de la intervención de Bohr	310
b) El significado objetivo de las relaciones de Heisenberg	318
c) ¿Existen, físicamente, las correlaciones EPR?	327
d) El compromiso ontológico de Bohr: una vía abierta al realismo de la física cuántica	335

5.3) Alternativa de Einstein a la Mecánica Cuántica: 1936-1955.....	344
a) Su teoría del conocimiento: el “credo epistemológico”.....	345
b) El origen y la formación de los conceptos físicos.....	362
c) El “Programa Maxwelliano” de Einstein: su alternativa física.....	367
d) El marco espacio-temporal y el concepto de campo.....	386
d) Conclusión. El realismo espacial de Einstein.....	399
VI- ANÁLISIS CRÍTICO DE LA POLÉMICA EINSTEIN-BOHR.....	413
6.1) La Terminología del Debate sobre la Teoría Cuántica.....	414
a) Referencialismo, representación y significado extralingüístico.....	414
b) “Modelos ostensivos” y “simbolismo” frente a la “visualización clásica”.....	425
c) La aportación de Einstein: la doble faceta, gnoseológica y ontológica, del “contenido intuitivo”.....	435
6.2) El Sentido de la Polémica: ¿Tiene Contenido Intuitivo la Mecánica Cuántica?.....	445
a) El requisito de Einstein para la intuición física: la intuición espacial como elemento objetivo de la realidad y base de su realismo crítico.....	447
b) El modelo de Bohr de inteligibilidad física: su criterio para el contenido intuitivo.....	463
c) La importancia del contenido intuitivo para el realismo cuántico.....	473
6.3) El Juicio de la Lógica y de la Experiencia en Suspense.....	479
a) El teorema de completitud de von Neumann.....	479
b) Las Desigualdades de Bell y el Experimento de Aspect.....	486
c) Variables ocultas frente a otras interpretaciones no-causales de la física cuántica.....	493
d) Conclusión. El ocaso de la representación pictórica como ideal realista de descripción física.....	504
VII- MÁS ALLÁ DE LA COMPLEMENTARIEDAD: SU FUNDAMENTACIÓN TEMPORAL.....	515
7.1) Investigaciones acerca de la Intuición Temporal.....	517
a) La fundamentación intuitiva del conocimiento: la tesis kantiana.....	518
b) Tres programas de fundamentación de la Matemática: la temporalidad.....	528

c) La fundamentación intuitiva de Bergson del conocimiento científico: la espacialidad.....	547
d) Un giro secante en torno al Esquematismo.....	561
7.2) Las Condiciones Gnoseológicas de la Complementariedad: Condiciones de Posibilidad del Entendimiento Sobre la Región Atómica.....	567
a)Distinción entre espacio y tiempo: su asimetría en tanto intuiciones.....	568
b)El simbolismo de la representación en la descripción cuántica.....	575
c)El principio de correspondencia bajo la intuición temporal.....	578
d)Más allá de la complementariedad: una tesis realista del mundo cuántico.....	584
7.3) Corolario Ontológico: Las Condiciones Físicas de Posibilidad de los Objetos Cuánticos.....	589
a)El mundo cuántico y el mundo clásico.....	589
b)El materialismo de los “objetos cuánticos” y sus condiciones de posibilidad como objetos.....	596
c)El fenómeno en tanto imagen simbólica del objeto cuántico y la espacialidad objetiva.....	604
c)Conclusión. Una propedéutica ontológica para la filosofía de la complementariedad.....	609
 APÉNDICES	
I- Teoría del Campo Único de Einstein.....	623
II- Apuntes acerca de la Fundamentación Intuicionista y Formalista de la Matemática.....	635
III- El Formalismo Cuántico.....	643
 BIBLIOGRAFÍA.....	 657

INTRODUCCIÓN

Año 1900. Alemania. Universidad de Berlín.

Un físico de tan sólo cuarenta y dos años realizó un descubrimiento que vendría a cambiar, para siempre, nuestra idea del mundo físico y del conocimiento científico. Nadie le advirtió de esto, ni tan siquiera él mismo lo pudo prever; quizás, de haberlo hecho, lo habría mantenido oculto, convirtiéndose en el devoto guardián de esa “caja de Pandora”, a la que se conoce con el nombre de “cuanto de acción”.

Cuando Max Ludwig Planck era estudiante, un profesor suyo le aconsejó que no malgastara su generoso talento en dedicarse a la Física, ya que, según aquél, ésta era una ciencia terminada y no habría investigación alguna que hiciera progresar el conocimiento humano en esta disciplina. El joven Planck desoyó este consejo; sin embargo su profesor tenía razón: la Física “Clásica” estaba acabada. Sin que Planck lo buscara, un nuevo instrumento teórico se le escurrió de las manos, abriéndose paso entre la arrebujada estructura de las teorías clásicas y ante el asombro de los científicos del pasado siglo XX.

Nadie sospechó, antes de que sucediera, que al adentrarse en el mundo de los átomos, en el interior de la materia, el antiguo modelo atomista, con el que se explicó la realidad material durante siglos, abriría un cisma entre el compuesto material y los elementos que lo conforman. Se descubrió que no son las mismas leyes las que dan cuenta de ambos niveles y, dado que no puede transitarse del uno al otro como de las partes al todo, el segundo, el nivel atómico, ya no explica el primero.

Debido a esto, la ciencia tuvo que replantearse no sólo su base conceptual, sobre la que se erigieron con anterioridad las teorías físicas, sino también el tipo de interpretación realista y determinista de las teorías científicas, que había sido defendido, explícita o implícitamente, por la mayoría de los científicos hasta entonces. En efecto, en el pasado hubo un tiempo en el que la física ofrecía una representación realista del mundo, de los objetos que le son propios, en función de una descripción causal de éstos en el espacio y en el tiempo, lo cual parecía ser garantía de objetividad y también de representabilidad, en el sentido de permitir imágenes visuales de los acontecimientos físicos que se desarrollan en el marco espacio-temporal.

No obstante, es bien sabido que la teoría cuántica vino a poner fin a este ideal de objetividad, suscitando cuestiones de orden epistemológico y ontológico, que hasta entonces no habían precisado ser debatidas en el seno de la ciencia natural por los propios científicos creadores de las teorías. En filosofía, en cambio, la *edad de la inocencia* había sido superada hace siglos: las obras de Hume y de Kant, entre otros, habían despertado a los filósofos del “sueño dogmático”, consistente en creer en un mundo objetivo regido por leyes causales, que se presenta al conocimiento humano tal y como es en sí mismo. En el ámbito filosófico, cuestiones relativas a la objetividad científica, a la racionalidad de la ciencia, a los métodos de aprehensión de lo real, a la viabilidad de tal empresa, etc., vienen siendo planteadas, con anterioridad al siglo XX, desde los más variados “-ismos”: realismo, instrumentalismo, positivismo, fenomenismo...

La novedad, por tanto, reside en el hecho de que estas cuestiones filosóficas, en el precedente siglo, hayan pasado a ser debatidas por la propia comunidad de físicos. En concreto, las cuestiones filosóficas planteadas por la teoría cuántica, en especial desde la tercera década del siglo XX, se han debatido en el contexto de las denominadas “interpretaciones de la mecánica cuántica”, que comenzaron a aparecer con posterioridad al establecimiento de los respectivos formalismos matemáticos de Heisenberg y Schrödinger entre 1925 y 1926.

Tras el Congreso de Como, en primavera de 1927, y el V Congreso Solvay, en otoño de ese mismo año, hasta la actualidad diversas interpretaciones se han ido ofreciendo: desde la conocida como interpretación de Copenhague hasta la actual teoría de la decoherencia, pasando por la doble solución de de Broglie, la interpretación mentalista de Wigner, los múltiples mundos de Wheeler, las teorías de variables ocultas locales y no-locales, además de los puntos de vista opuestos a Copenhague de Einstein y Schrödinger, entre otros.

Por otro lado, desde el punto de vista de la evolución de la mecánica cuántica, ésta ha crecido hasta convertirse en *física cuántica*, alcanzando a otras de sus ramas, como son la electrodinámica de Feynman o la teoría cuántica de campos; asimismo, nuevos fenómenos han ido apareciendo, como el efecto Hall cuántico fraccionario de 1982, o el descubrimiento del leptón tau en 1975, de la partícula Z en 1983, o del quark cima en 1995; nuevas tecnologías son utilizadas como es el caso de la invención en 1973 del escáner de resonancia magnética o la propia invención del láser en 1960, además del magnetómetro SQUID (“Superconducting Quantum Interference Device”), un dispositivo superconductor de interferencia cuántica capaz de captar las ondas

materiales de los objetos macroscópicos, y del microscopio de barrido de efecto túnel, el STM (“Scanning Tunnelling Microscope”); se ha avanzado en nuevos descubrimientos y maravillas cuánticas, como la teoría de la superconductividad y su aplicación en 1987 a las altas temperaturas, la unificación en 1973 de dos de las cuatro fuerzas fundamentales, la electromagnética y la fuerza débil presente en el núcleo atómico, unificándose en la llamada electrodébil, sin dejar de mencionar la teoría del teletransporte cuántico de 1993 y el descubrimiento de condensados Bose-Einstein en 1995.

A pesar de que hayan transcurrido casi ocho décadas desde que Niels Bohr presentara a la comunidad de físicos sus propuestas basadas en la noción de complementariedad, la presente tesis supone una apuesta por una revisada vuelta a los planteamientos de este físico danés.

Partiendo del hecho de que ni hay ni puede haber un algoritmo matemático que permita decidir de modo automático la debatida cuestión de la interpretación de la mecánica cuántica, ni tampoco, desde luego, un experimento crucial capaz de zanjar la cuestión de una vez y para siempre, todo indica que, pese a los intentos de Roland Omnès uno de los artífices de la teoría de la decoherencia, por convertir el asunto de la interpretación en teoría, en este tema sigue habiendo lugar para la discusión y el diálogo filosófico.

Según el mencionado físico francés, en su obra *Philosophie de la Science contemporaine*, ejemplo típico de la vía a la que había conducido la interpretación de Bohr es la conversión en norma de la siguiente prohibición: “no hablarás del mundo atómico en sí”¹. Con dicha prohibición, de resonancias kantianas, Bohr habría impuesto la sentencia de “lo inaccesible”, de “lo impensable”. En ese sentido, tanto el físico Bohr como los filósofos Hume y Kant son apodados por Omnès “los grandes príncipes de lo prohibido”².

Simplificando un tanto la cuestión, podría en cierto modo decirse que la revisión acerca de lo acertado o desacertado de la concesión a Bohr de tan nobiliario título está en el origen histórico de la presente tesis. Así, partiendo de la sospecha, que no, por supuesto, de la certeza, de lo inadecuado de tal nombramiento, esta investigación nació con el propósito

¹ “Tu ne parleras pas du monde atomique en soi”. OMNÈS, R., *Philosophie de la Science contemporaine*, Gallimard, Paris, 1994, p. 240.

² “Puede así considerarse a Hume, con su renuncia a conocer el origen del orden del mundo, a Kant, con sus irresolubles antinomias, y finalmente a Bohr, como los grandes príncipes de lo prohibido”. *Ibid.*, p. 241.

de revisar hasta qué punto, ateniéndonos al marco de la complementariedad, es posible un pronunciamiento ontológico que rebase los límites de una concepción instrumentalista, fenomenista o idealista de la mecánica cuántica.

Como telón de fondo de esta empresa conviene explicitar la existencia de dos supuestos que a modo de postulados han presidido la elaboración de esta tesis doctoral. El primero se refiere a la constatación de una cierta superioridad de la interpretación de Copenhague sobre otras debido a su mayor economía y simplicidad desde el punto de vista lógico. Dicho de otro modo, es la interpretación que requiere menos supuestos adicionales. El segundo tiene que ver con la convicción personal (convicción que, como tal, carece de valor probatorio y juega un papel meramente heurístico) de que no puede negarse a la ciencia natural, en general, y a la física, en particular, una capacidad descriptiva y explicativa del mundo de objetos extra-lingüísticos a los que sus conceptos y teorías remiten. En ese sentido, una interpretación realista de las teorías científicas se consideraría preferible a cualquier tipo de instrumentalismo.

En las páginas que siguen no se pretende, en modo alguno, pasar revista a las numerosísimas objeciones que, desde el punto de vista lógico, epistemológico, sociológico, etc., se han presentado en contra del realismo científico. El objetivo es otro, y para su explicitación conviene aportar otra clave más.

Filósofos como Henri Bergson, por ejemplo, han creído consustancial al modo de conocimiento racional, del que la ciencia es su mejor producto, la concesión de prioridad gnoseológica al espacio frente al tiempo, alterando con ello la naturaleza misma del tiempo, cuya aprehensión estaría supuestamente reservada a la intuición. No es momento de entrar aquí en los argumentos, por otro lado bien conocidos, sobre los que este filósofo francés trata de sustentar su tesis. Lo fundamental es recordar la radical asimetría entre espacio y tiempo que, en su opinión, ha presidido la construcción de la ciencia moderna y, en especial, la mecánica clásica.

Pues bien, la hipótesis que aquí se baraja con respecto a la interpretación de Bohr de la mecánica cuántica es justamente la inversa de la que Bergson aplica a la mecánica de Newton, e incluso a la de Einstein, y es la siguiente. Cabe la posibilidad de que una novedosa puerta de entrada a una lectura realista de la filosofía de Niels Bohr pueda consistir en la negación del tratamiento simétrico que, desde una perspectiva ontológica y epistemológica, este físico parece ofrecer de espacio y tiempo. En concreto, se trata de analizar si la negación de esa simetría podría conducir a una

fundamentación prioritariamente temporal de la descripción de los objetos microfísicos. Abundan los textos Bohr donde se refiere a la necesidad de una consideración de la descripción espacio-temporal en el nuevo marco lógico de la complementariedad, por un lado, y de la explicación causal, por otro. Aquí se trata de saber si podemos ir con Bohr más allá de Bohr, en la medida en que su noción de complementariedad permita, e incluso exija, una atribución de mayor significación al tiempo frente al espacio.

Si esta hipótesis estuviera bien fundada, ello haría posible enfocar la polémica Einstein-Bohr, no como una pugna entre un modo de interpretación realista y no-realista, respectivamente, de la mecánica cuántica, sino como la oposición entre dos tipos de realismo, uno eminentemente espacial –el de Einstein– y otro eminentemente temporal –el de Bohr–.

Un último aspecto conviene destacar en estas páginas previas al comienzo propiamente dicho de la presente tesis. Decía Moritz Schlick, el filósofo fundador del Círculo de Viena, que con el modelo de átomo de Rutherford-Bohr, en el que los electrones sólo pueden moverse en ciertas trayectorias discretas, en la medida en que no permite una visualización de las relaciones electrodinámicas, “hemos llegado al límite de la *cosmovisión pictórica*”. Nos hallamos ante un modelo que, al no ser visualizable, tampoco puede ser percibido ni imaginado y, por tanto, ya no puede constituir “una imagen inmediata de la naturaleza”³. Por otro lado, sigue diciendo Schlick, hasta la aparición de dicho modelo, “la conexión entre teoría y realidad era concebida como si los símbolos que aparecen en las leyes de la naturaleza representaran magnitudes y cantidades simples que podían ser directamente percibidas”⁴. En cambio, “en el estadio más reciente del desarrollo de la física ha llegado a entenderse que la prolongación de las condiciones espacio-temporales prevalecientes en las regiones de lo directamente mensurable, hasta el reino de lo invisiblemente pequeño, no está permitida. De acuerdo con ello, la interpretación de los microprocesos en cuanto visualizables y el método de representación por medio de modelos han sido abandonados”⁵.

En mi opinión, todo apunta a que, cuando un proceso puede ser “representado visualmente”, parece claro y comprensible y su conexión con

³ SCHLICK, M., *Filosofía de la Naturaleza*, edición de José Luis González Recio, Ediciones Encuentro, 2002, p. 27.

⁴ *Ibid.*, p. 38.

⁵ *Ibid.*, p. 41.

la realidad no suele ser problematizada (o no, al menos, en el ámbito de la ciencia natural). Por otra parte, pese a que Schlick alude a la inaplicabilidad de las condiciones espacio-temporales a los micro-objetos como causa de la imposibilidad de visualización y de representación por medio de modelos pictóricos, podría resultar que fuera únicamente el espacio, y no el tiempo, el responsable de esta nueva situación⁶.

De hecho el propio Schlick, en relación con este tema, afirma lo siguiente: “Hasta ahora hemos tomado el modelo como una estructura pictórica imaginable. Imaginar «pictóricamente» significa representarse en la imaginación las percepciones que uno tendría si observara o retuviera la estructura directamente. Para que esto sea posible, la estructura no ha de ser ni demasiado grande ni demasiado pequeña y, en cualquier caso, debe ser una estructura espacial. Por lo tanto, para evaluar el conocimiento basado en modelos debemos entender la índole propia de lo espacial. Aún más: *puesto que hemos definido la naturaleza como aquello que existe en el espacio, el análisis del concepto de espacio debe siempre ocupar un lugar central en la filosofía de la naturaleza*”⁷.

Comparto con Schlick la importancia que, en su opinión, para la ciencia clásica, y muy especialmente para la mecánica, tienen los modelos visualizables, las representaciones pictóricas que, a su vez, permiten imágenes inmediatas de la Naturaleza y, lo que es más importante, facilitan la *conexión entre teoría y experiencia*. Incluso la posibilidad de percibir o imaginar no es concebible al margen de toda representabilidad pictórica. Dicha representabilidad se pierde cuando el ámbito de objetos a estudiar por una determinada disciplina deja de ser una estructura espacial. Pero el precio a pagar por dicha pérdida es mucho mayor, puesto que suele acarrear un notable *debilitamiento de los compromisos ontológicos que esa disciplina está en condiciones de asumir*.

Si Schlick ha definido la naturaleza como aquello que existe en el espacio, la cuestión es si no podría sostenerse que tal definición convenga únicamente al dominio de objetos para los que no rige la constante de Planck, en tanto que habría de concederse al tiempo un mayor protagonismo allí donde dicha constante se hace presente.

Ésta es la lectura de la filosofía de Niels Bohr que se propondrá en la presente tesis doctoral. En concreto, puesto que la fundamentación

⁶ En el séptimo capítulo se abordará una posible objeción derivada del tratamiento diferenciado e independiente que aquí se está haciendo de espacio y tiempo, en contra de lo que parece derivarse de la Teoría de la Relatividad.

⁷ Ibid., p. 42. (La marca en cursiva no figura en el original).

temporal de la complementariedad es punto de llegada, se abordará el séptimo y último capítulo, que debe asimismo ser considerado como el apartado en el que se recogen las conclusiones de esta investigación a modo de tesis. Para llegar hasta ellas se parte, en el capítulo primero, del análisis del ideal clásico de descripción, que incluye entre sus postulados el representacionismo pictórico que la nueva ciencia pondrá en entredicho. Tras un segundo capítulo, que sólo pretende ofrecer algunos apuntes históricos sobre el origen de la física cuántica y que en ningún caso se propone hacer aportaciones originales a la historia de la ciencia de ese periodo, en el capítulo tercero se estudia el conflicto que para la descripción física clásica de la Naturaleza, y especialmente para la forma de representación pictórica, supone el nuevo formalismo matemático cuántico. El capítulo cuarto se detiene en el análisis de la complementariedad desde el punto de vista epistemológico, mientras que los capítulos quinto y sexto están dedicados a la polémica Einstein-Bohr desde la perspectiva insinuada en esta introducción. Por último, tres apéndices completan esta tesis doctoral: el primero sobre la teoría del campo único que persiguió Einstein, el segundo sobre la fundamentación intuicionista y formalista de la Matemática, y el tercero sobre la estructura matemática del formalismo cuántico.

CAPÍTULO I:

«EL IDEAL CLÁSICO DE DESCRIPCIÓN DE LA NATURALEZA»

Dado el tema de mi investigación, he considerado importante comenzar dando un paso atrás; por ello, en este capítulo expondré el ideal descriptivo de la ciencia moderna y el marco conceptual de la física clásica, ya que la crisis, que introduce la física cuántica en la ciencia, afecta por completo a todo cuanto se diga a continuación: ésta romperá con aquellos postulados del marco clásico, con los que la física tradicional conseguía describir y explicar la realidad.

Es decir, la forma cómo aquélla consiguió llevar acabo este ideal de descripción física fue proponiendo su propio marco conceptual, el cual parte de tres elementos propios del programa mecanicista: el atomismo y la geometrización de la Naturaleza, el modelo de continuidad electromagnética para la evolución dinámica de los sistemas físicos y el paradigma racionalista, inscrito en el seno del realismo científico.

A continuación desglosaré este marco, que fue la base sobre la que se levantaron todas las teorías clásicas de la ciencia moderna. Para el tema de este estudio es más relevante el contenido conceptual de dicha base teórica que el desarrollo particular de las teorías mismas, pues es en ella donde anidan los objetivos, los conceptos, los postulados y los principios o ideales fundamentales, a los que se enfrentará directamente el nuevo marco teórico de la física cuántica.

A lo largo de este trabajo se irá viendo que, a pesar de las renunciadas a los siguientes ideales concretos, negando la posibilidad del tipo de conocimiento científico tradicionalmente admitido por la ciencia clásica, la nueva teoría intentará conservar el ideal general de descripción física, ya que éste implica que las teorías físicas poseen un cierto contenido intuitivo que las pone en correspondencia con el mundo objetivo que están describiendo.

1.1) *Los Objetivos Mecanicistas y la Conceptualización de la Física Clásica*

La realidad física se suele dividir en tres niveles: el *microcosmos*, o el mundo de lo muy pequeño, no accesible a nuestra percepción inmediata; el *mesocosmos*, que es la escala humana donde se desarrollan los fenómenos que sí pueden ser percibidos a través de nuestros sentidos, aunque para medir sus valores con precisión utilizemos instrumentos como intermediarios; y el *macrocosmos*, el nivel de los grandes números, grandes distancias, velocidades y masas, que también quedan fuera de nuestra percepción sensorial.

La materia del nivel mesocósmico se entendía de manera discontinua en función de esos constituyentes simples, que forman el nivel microcósmico, los cuales poseían las mismas características que su compuesto. Con lo cual se tendía un puente entre las partes y el todo, que permitía reconstruir el cuerpo a partir de estos átomos, en los que se había descompuesto la materia para poder entenderla¹.

La ciencia clásica de los siglos XVII y XVIII nació a partir del programa cartesiano de describir el mundo a través de figuras y movimiento y desembocó en un materialismo mecanicista que lo explicaba todo de la misma forma, suponiendo que todos los objetos del nivel mesocósmico y microcósmico eran reales en el mismo sentido: cuerpos reducidos a puntos geométricos, dotados de masa, que van errando por el espacio y tiempo absolutos, y que interactúan entre sí en función de las variaciones del momento y de la energía, según la ley de proporcionalidad de la fuerza y la aceleración². Así, se llamó “mecánica newtoniana” o “clásica” a la teoría que describe el movimiento de estos cuerpos materiales en el marco espacio-temporal y su evolución dinámica, y que, en principio, permite el estudio de todos los movimientos de los objetos macroscópicos a velocidades ordinarias. Pero, además, la mecánica newtoniana se basa, como el resto de las teorías clásicas, incluida la teoría electromagnética, en el paradigma del racionalismo científico, que brotó a partir del siglo XVI con la finalidad de construir un ideal descriptivo y explicativo de la realidad objetiva.

¹ Más adelante me detendré algo más en esta hipótesis clásica de la “Unidad del Universo”.

² Se trata de la segunda ley fundamental de la dinámica newtoniana: $F=m \cdot a$, donde la fuerza aplicada sobre un cuerpo determina la aceleración que experimentará ese cuerpo en función de su masa, es decir dependerá de la fuerza con la que el cuerpo se resiste al movimiento, cuya cantidad es constante en el mismo cuerpo.

a) El ideal realista de la ciencia moderna y su modelo de inteligibilidad

La ciencia moderna nació con un determinado ideal descriptivo, cuyo objetivo era describir y explicar la Naturaleza. De acuerdo con la tesis de Alberto Elena³, fue Nicolás Copérnico (1473-1543) quien inauguró esta nueva concepción realista de la ciencia, ya que en su época reinaba la discordia entre dos esquemas distintos para abordar la astronomía: las exigencias de predicción, que proponían los astrónomos ptolemaicos siguiendo un patrón instrumentalista, y las exigencias realistas de explicación, defendidas por los físicos peripatéticos. Ésta fue una polémica que se remontaba hasta la época de Platón, Aristóteles y del astrónomo Eudoxo y que se extendió hasta el siglo XV, pasando por los autores ptolemaicos⁴.

Eudoxo (408-355 a.c.), junto con los ptolemaicos, no concedía realidad material a las esferas homocéntricas de los planetas y de las estrellas fijas, presentes en la física celeste de Aristóteles, y encabezó la concepción instrumentalista en la astronomía, desde la que se pensaba que las teorías científicas eran únicamente artilugios operativos, las cuales sólo servían para el cálculo predictivo matemático, cuyo valor, exclusivamente pragmático y heurístico, era el de ofrecer las herramientas necesarias para manipular el mundo. Es decir, la ciencia no tenía otra pretensión más que la de ser un conjunto de conocimientos útiles para resolver problemas de cálculo en función de la predicción. Por tanto, para los ptolemaicos, el objeto de la astronomía no es dar una explicación de los fenómenos celestes, lo importante es construir un modelo teórico que dé razón de los movimientos aparentes a partir de movimientos uniformes. Estos modelos

³ Cf. ELENA, A., Las quimeras de los cielos, ed. Siglo XXI, Madrid, 1958. BURTT, E. A., Los fundamentos metafísicos de la ciencia moderna, ed. Sudamericana, Buenos Aires, 1960. BUTTERFIELD, Los orígenes de la ciencia moderna, ed. Taurus, Madrid, 1958. COPÉRNICO/ DIGGES/ GALILEO (rec. Alberto Elena), Opúsculos sobre el movimiento de los planetas, ed. Alianza, 1986.

⁴ Los ptolemaicos son un grupo de astrónomos que vivieron entre el siglo III a.c. y el siglo II d.c. y que toman su nombre de Ptolomeo, un astrónomo del siglo XV, que fue quien recopiló el trabajo de todos ellos, dando su forma definitiva al sistema ptolemaico. Aunque, en realidad, más que un sistema, Ptolomeo disponía de una “caja de herramientas” que utilizaba según iban surgiendo los problemas acerca de los movimientos de cada planeta, los cuales eran descritos por este modelo predictivo siempre de forma aislada y sin relacionarlos con los demás.

son formales e instrumentalistas en el sentido de que no describen lo que realmente ocurre en el universo: la teoría es ajena a la realidad; su objetivo es sólo predecir, sin atender a las causas físicas, y obtener conocimientos que permitan anticiparse a lo que va a pasar, haciendo uso de las matemáticas, y en concreto, de la geometría, como meros artilugios predictivos. El instrumentalismo considera a la astronomía simplemente como ciencia que ha de “salvar los fenómenos”, desdeñando el carácter racionalista, que esta idea platónica implicaba.

En oposición a Eudoxo y los ptolemaicos, Aristóteles y los peripatéticos eran físicos y por ello sí estaban preocupados por dar una explicación de las causas reales de las cosas, haciendo más hincapié en que lo importante es *describir el mundo tal y como es y por qué* suceden las cosas. Su interés por este aspecto llegaba hasta el extremo de dar más importancia a mantener la teoría del movimiento natural y conceder realidad material a las esferas celestes en la cosmología aristotélica, aunque aquello se tratara de un fuerte impedimento para la exposición de una teoría predictiva sobre el movimiento de los cuerpos celestes. Son pensadores realistas porque creen que es posible la explicación de lo que *realmente* ocurre en el Universo y ésta es su exigencia de verdad, una verdad explicativa causal; no predictiva.

En pocas palabras, un astrónomo afirmaba que lo importante es elaborar una teoría capaz de predecir, no de describir, pues su campo de estudio, como astrónomo, está delimitada por el criterio instrumentalista y por esta forma de entender la ciencia astronómica. Sin embargo, un físico defendía que es absolutamente ilegítimo que a un astrónomo sólo le interese una descripción con carácter predictivo y que aquél describa un mundo sin que se decida por si tiene realidad física o no el modelo predictivo que está ofreciendo.

Copérnico, con su propuesta realista, unirá ambas posturas, pero le costó toda una revolución epistemológica en la astronomía recuperar aquel ideal explicativo, desde el cual la ciencia descubre el mundo y nos acerca al conocimiento de éste tal y como es en realidad, sin renunciar al carácter matemático y al valor predictivo del programa instrumentalista. Hará compatible, en este aspecto, la astronomía con la cosmología (o física celeste), aunque no lo consiga con la física terrestre; este logro lo alcanzará Galileo. Pero su fracaso con la física no ensombrece la valiosa contribución de Copérnico al giro epistemológico que tomó la ciencia moderna, ya que, nunca hasta entonces aquéllas habían estado unidas; todo lo contrario, siempre separadas como dos esquemas distintos de concebir la

ciencia: el modelo predictivo del instrumentalismo y el modelo descriptivo y explicativo del realismo físico.

Con este objetivo, Copérnico introduce una nueva cosmología⁵ apoyada por un programa astronómico detallado y elaborado matemáticamente, que predecía y daba explicaciones de todos los movimientos planetarios, porque no le bastaba un sistema meramente computacional como era el ptolemaico. Por tanto, las razones que impulsaron a Copérnico a defender su sistema heliocéntrico están en relación con que era un pensador realista, aunque también era un racionalista, ya que en la época de Copérnico reaparece la idea platónica de la armonía del universo, produciéndose un movimiento matemático de vuelta a los elementos platónicos y pitagóricos como modelo de inteligibilidad de la ciencia.

Según esta doctrina el mundo es inteligible porque tiene una estructura racional, ordenada y armónica, que nosotros podemos entender y describir desde la matemática, el número y la geometría: la *razón matemática* es proporción y para comprender el mundo hay que abordarlo desde su armonía, regularidad, sencillez y uniformidad, donde todas las cosas tienen sus proporciones matemáticas. Esta idea se oponía a la postura de Aristóteles, que sólo le da al número una importancia intermedia. En cambio, para los platónicos y pitagóricos la esencia del mundo era

⁵ Plantea su sistema heliocéntrico, en 1513, para hacer compatible la astronomía con la cosmología en un sistema más económico y armónico, capaz de dar explicación y relacionar hechos independientes dentro de un mismo esquema metal lógico y asequible que se correspondiera con la realidad, condiciones éstas que no cumplían las anteriores teorías ptolemaicas. Por ello, la teoría de Copérnico no es un mero instrumento predictivo que no indaga las causas reales, sino un sistema que, además de predecir, aspira a describir el mundo tal y como es. Pero, cuando Copérnico escribió su *De Revolutionibus*, Osiander, un teólogo luterano, incluyó un prólogo, en el cual se planteaba el sistema copernicano desde un enfoque instrumentalista, para suavizar el contenido de aquél. Osiander presenta la teoría de Copérnico como una hipótesis heurística que no tenía por qué ser real, era una herramienta teórica, como cualquier otra equivalente, que no explica la configuración de la realidad, sino que sirve únicamente para hacer cálculos en función de la predicción. Sin embargo, nada más lejos de la intención de Copérnico, que era la de ofrecer una auténtica descripción de la realidad; su sistema heliocéntrico pretendía ser una concepción real del cosmos y estaba convencido de la realidad de su teoría. Convicción que compartía con astrónomos como Thomas Digges y J. Kepler y con Galileo Galilei. Este último buscó la explicación física del sistema copernicano, una explicación de las causas de por qué el mundo es como es, es decir, heliocéntrico. Si la postura de Copérnico hubiese sido instrumentalista (sólo en vista a los cálculos), Galileo afirma que jamás hubiera abandonado las teorías ptolemaicas, que no sólo daban los mismos resultados que la copernicana, sino que, además, eran mucho más cómodas y fáciles de utilizar.

matemática y el número era la base de toda ella, incluso de la geometría, desde la cual podíamos conocer la estructura de la realidad: *el espacio de la geometría era el espacio real del universo real*. La identidad entre astronomía y geometría era una importante doctrina metafísica: lo que se afirmaba y era verdadero de una, lo era también, necesariamente, de la otra.

De esta forma, Copérnico acabó con aquel conflicto en el que la ciencia, o bien, explicaba pero no predecía, o bien, predecía pero no explicaba y consiguió, por primera vez, hacer compatible en astronomía un sistema predictivo que es, a la vez, explicativo y en el que se alude a la realidad⁶.

Así fue cómo se inauguró una nueva concepción de la ciencia cuyos objetivos conjuntos son la predicción y la explicación: un nuevo patrón de racionalidad científica muy fructífero, que acabó desplazando al antiguo instrumentalismo de “salvar las apariencias” y que se impuso en los años sucesivos. La Modernidad hizo extensivo aquel ideal a todas las ramas de la ciencia y convirtió en su principal objetivo la descripción y la explicación física del mundo que nos rodea; sin embargo, para lograr esta meta, se ha de tender un puente entre el mundo y la teoría, para que ésta esté en condiciones de poder explicarnos aquél. Tal conexión, que viene impuesta por el modelo de inteligibilidad que se esté usando, se realiza a través de unos determinados conceptos físicos, de los que se exige que sean descriptivos y explicativos, al mismo tiempo que han sido previamente matematizados.

Así pues, el marco conceptual de la ciencia clásica se fue edificando, siglo tras siglo, con la finalidad de conectar teoría y experiencia para satisfacer dicho ideal de realismo y descripción física, al que se subordinan el resto de los ideales clásicos. Por tal razón, una teoría no sólo

⁶ Esta postura realista es la que le llevó a rechazar las teorías ptolemaicas por su falta de uniformidad, que Copérnico considera indispensable en la realidad: aquellas eran *falsas* porque no se correspondían con la realidad, debido, sobre todo, a que el punto ecuante, introducido por Ptolomeo para garantizar la velocidad uniforme de los planetas en torno a este punto desplazado del centro del universo, infringía el principio de simplicidad y armonía matemática de la Naturaleza. Esta crítica de Copérnico a las teorías ptolemaicas guarda relación con el modelo racionalista de realidad: por medio de las matemáticas podemos descubrir aquella estructura real, ordenada y armónica del universo y la astronomía es la descripción de esta realidad, sin ficciones ni apariencias; de tal forma que las causas físicas, en este contexto realista de corte racionalista, son las causas reales, y las hipótesis astronómicas son verdaderas o falsas, en función de un determinado ideal descriptivo realista, desde el punto de vista físico. A partir del capítulo V, se podrá ver que la crítica de Einstein a la teoría cuántica está en la misma línea que la de Copérnico a la astronomía ptolemaica.

ha de ser predictiva y carecer, por supuesto, de incoherencias internas, sino también explicativa, es decir, ha de tener un “contenido físico”⁷ desde el que se establezca una *correspondencia entre los términos de la teoría y los elementos de la realidad*, para poder fondear en su comprensión. Más adelante, en el próximo apartado, se podrá comprobar cómo el marco conceptual de la física clásica alcanzó este objetivo, postulando la continuidad de las conexiones causales, el representacionismo pictórico del lenguaje científico, la independencia de las propiedades geométricas y dinámicas y, por último, la isomorfía en todos los niveles de la realidad.

No obstante, el objetivo principal de este trabajo es analizar la posibilidad de conseguir hacer efectivo aquel ideal a través de otras condiciones epistemológicas, que en muchos casos son diametralmente opuestas a las condiciones clásicas, ya que toda la polémica que suscitó la física cuántica sólo se plantea si se parte de dos supuestos indubitables para la ciencia, uno ontológico y otro epistemológico: la realidad y exterioridad del mundo físico y la capacidad de las teorías científicas de describir y explicar esa realidad. Pero, si se rechaza el ideal explicativo y descriptivo de la ciencia moderna, el cual encierra ambos supuestos, y se mantiene una postura instrumentalista, entonces nada de lo que se diga aquí tendrá sentido. Sólo si se acepta la idea de que todos los esfuerzos de los físicos a partir de 1926 se centraron en mantener este ideal realista de una forma u otra, frente al instrumentalismo, se podrá entrar en las discusiones y conflictos que la física cuántica suscitó, ya que he de insistir en que las controversias no giraban en torno a la capacidad que tienen o no las teorías de describir el mundo: esto estaba fuera de toda duda; aquello sobre lo que se debatió fue acerca de cómo deben esas teorías describir el mundo para ofrecer una explicación de él y, por tanto, si la física cuántica, como teoría concreta, tenía o no esta capacidad. ¿Es posible que existan diferentes vías a la hora de lograr tal ideal? ¿O, acaso, sólo existe un modo de conceptualizar la experiencia, confinado dentro de los límites de la física clásica?

⁷ De momento sólo diré que un concepto con contenido físico, o contenido intuitivo, es aquél que no sólo tiene un valor predictivo o pragmático, no es, únicamente, un instrumento útil para manipular la naturaleza, pues, además de esto, es capaz de *describir* la realidad a través de aquella correspondencia. Dejaré para más adelante las cuestiones que tal compromiso ontológico del lenguaje de la física plantea acerca del cómo y del porqué de esta capacidad; sólo avanzaré que tal contenido viene establecido por nociones espaciales y temporales, siendo éstas, en última instancia, las responsables del tipo de conexión que la teoría mantiene con el mundo objetivo.

b) Atomismo y geometrización de la materia

La física clásica nació durante el siglo XVII con la finalidad fundamental de describir y explicar los fenómenos naturales. Ya mencioné, con anterioridad, que esta descripción se alcanzó siguiendo la propuesta mecanicista que René Descartes (1596-1650) elabora desde su geometría analítica, a través de figuras y movimientos⁸. El objetivo fundamental de aquélla es lograr una matematización de la realidad natural, a fin de ofrecer una descripción matemática de todos los fenómenos, incluidos los terrestres, en la cual las cualidades secundarias de la materia se puedan explicar desde las primarias: la *extensión* y el *número*. Es decir, se trataba de reducir las propiedades cualitativas de los cuerpos a cantidades calculables, desde las que poder descubrir las regularidades matemáticas que rigen el comportamiento de aquéllos y asignarles las leyes cuantitativas que los gobiernan⁹.

Con la finalidad de facilitar una perfecta adecuación entre la realidad y los conceptos elaborados por la teoría, se llevó a cabo una *idealización de la experiencia ordinaria*, a partir de la cual se explicaba la naturaleza y el comportamiento de los fenómenos que se observan en ella. Por consiguiente, la experiencia, tal y como se nos presenta a la percepción, era el objeto de estudio, pero no el fundamento de la explicación racional. El verdadero fundamento del estudio del movimiento era una *experiencia idealizada*, en la que algunos conceptos descriptivos, sacados de nuestra experiencia ordinaria, fueron refinados a partir de ciertos postulados teóricos, desde los que se permitía la racionalización de lo real, que el programa mecanicista propuso desde las matemáticas¹⁰. Este

⁸ Cf. ANDRADE E SILVA, J./LOCHAK, G., Los cuantos, pp. 15-23.

⁹ La distinción entre cualidades primarias, las cuantitativas, y secundarias, las propiamente llamadas “cualidades”, permitió que se pensara por primera vez en la posibilidad de lograr una descripción matemática de toda la Naturaleza, ya que, anteriormente, sólo se consideraban matematizables los movimientos regulares de los cuerpos celestes, respetándose la distinción aristotélica entre física celeste y física terrestres. Esta última era una física cualitativa no reducible a ninguna cantidad que permitiera elaborar leyes matemáticas, universales y eternas, como las que regían el Cielo, porque en la Tierra sólo se daban las irregularidades propias de un mundo imperfecto y sometido a la corrupción y a constantes alteraciones.

¹⁰ Cf. EINSTEIN, A./INFELD, L., La evolución de la física, p. 5. Los experimentos ideales fueron introducidos por Galileo en la ciencia experimental para explicar la experiencia desde su esencia, una esencia matematizada por el modelo racionalista de realismo científico, que acabo de exponer. Su llamado “método experimental” se refiere a una experiencia ya

programa mecanicista fue, como ya se ha visto, la continuación del racionalismo científico que resurgió en el siglo XVI, debido, en gran parte, a los progresos de la matemática, y que seguía la tradición pitagórico-platónica.

El resultado de este proceso fue una experiencia “tamizada” por la teoría bajo el supuesto racionalista de que sólo lo matemático es real. Así pues, estos conceptos no eran del todo empíricos porque se habían sacado de una experiencia *racionalizada*, modelada por la propia teoría, que se erigía como modelo explicativo de todo lo real¹¹.

De momento lo único que me interesa resaltar aquí es que en todo proceso de construcción de una teoría científica se parte de unos postulados, que analizaré más adelante, siendo el propósito de este apartado dejar constancia de este hecho: en tanto haya una matematización de la realidad habrá siempre una base conceptual que regirá el desarrollo de este proceso; no se juzgará la validez de tal proceder, sino sólo la validez de los postulados clásicos. Pues, este procedimiento no es perjudicial a la ciencia, todo lo contrario, es muy fructífero, pero a la hora de comprender una determinada teoría hay que sacar a la luz sus supuestos y reconocerlos como meros puntos de partida, que pueden ser sustituidos por otros y provocar así la aparición de una nueva teoría. La tarea epistemológica consistirá, entonces, en explicitar estos postulados con el fin de comprender mejor el contenido conceptual de las distintas teorías.

Previamente al análisis que expondré a continuación, he de advertir acerca de la diferencia que manejo entre *concepto* y *magnitud*: las magnitudes son el tipo de propiedades que se les puede atribuir a los objetos físicos, asignándoles una cantidad numérica o bien un vector en función de sus respectivas unidades métricas. En tanto que los conceptos se refieren a la idea desde la que se ha de definir el objeto y sus propiedades y en función de

idealizada por ciertas leyes matemáticas, consideradas universales, necesarias y eternas por ser la expresión de aquella esencia de la Naturaleza.

¹¹ Por ejemplo, en cuanto al concepto de espacio se le definió “a partir de las mismas leyes del movimiento, considerándolo no con relación a un sistema físico real cualquiera, sino con relación a un hipotético sistema de referencia donde la ley de la inercia sería válida. A pesar de las apariencias esto no constituye una exigencia de principio, sino un postulado sobre el mundo físico; en realidad un extraño postulado. (...) Extraño postulado, decíamos, porque el Espacio absoluto es una abstracción, una especie de protección al abrigo de la cual nos servimos del *espacio relativo*, definido con relación al Sol y a las estrellas lejanas. El papel del Espacio absoluto no consiste más que en asegurar una base de principio a la Mecánica...”. ANDRADE E SILVA, J./LOCHAK, G., Los cuantos, p. 21.

la cual se podrán establecer esas unidades con las que medir exactamente el valor de las magnitudes.

De esta forma, al concepto de espacio y al de tiempo le corresponde la propiedad de localización espacial y temporal, al de materia la de masa inerte y gravitatoria, y al de energía aquellas propiedades dinámicas o energéticas como es la energía del movimiento, llamada *energía cinética*, o, en sentido restringido, *velocidad* del cuerpo¹². Dicho esto, hablaré de los conceptos básicos sobre los que se edificó la mecánica clásica, que fueron: espacio, tiempo, materia y fuerza, los cuales cumplían una función muy precisa dentro de la teoría.

El espacio y el tiempo formaban el marco de referencia absoluto desde el que poder asignar a cada cuerpo su posición exacta; la naturaleza de este marco era continua, razón por la cual también se le llama el “continuo espacio-temporal”, y se le consideraba un receptáculo vacío donde se insertan los cuerpos y sobre los que no produce ninguna alteración en su estado de movimiento dinámico, pues carece de efectos energéticos sobre los cuerpos que contiene. Éste era el marco espacio-temporal absoluto de Newton, cuyas partes están yuxtapuestas, en el caso del espacio, o bien son sucesivas en el caso del tiempo; pero en ambos eran homogéneas, es decir, no había partes últimas, o límites, que se diferenciaban del resto. De modo que, no había ni principio ni fin: el espacio era infinito y plano, y el tiempo era un fluir eterno de los instantes temporales, vacíos de acontecimientos.

Se trata de un espacio y un tiempo idealizados por las condiciones de matematización, establecidas por la teoría, para poder asignarles una unidad exacta con la que medir y calcular las características espaciales y temporales, atribuibles a los cuerpos; éstas son las llamadas *propiedades geométricas*. La exactitud con la que se puede dar esta localización depende de la precisión con la que se pueda determinar el valor de las propiedades geométricas de los cuerpos, es decir, de la exactitud con la que puedan ser medidas.

Por este motivo es tan importante la matematización del espacio y el tiempo, ya que es lo que permite hacer observaciones cuantitativas al asignarles unidades de medida, que es uno de los elementos indispensables para construir una teoría científica. Pero, en tanto que la cuestión está en

¹² Para que toda magnitud tenga un contenido, o sentido, físico preciso debe ir asociada a un concepto; las discusiones epistemológicas sobre una teoría física se desarrollan en el nivel conceptual acerca de cuáles son los conceptos apropiados para determinada magnitud y cuáles son sus características o propiedades físicas.

dar una descripción espacio-temporal de los cuerpos, ésta no será la única condición necesaria para cumplir ese objetivo.

Para poder precisar la localización de los objetos materiales, además de lo anterior, éstos se han de explicar desde el modelo corpuscular, porque lo importante de la materia, para una explicación mecánico-clásica de la Naturaleza, es que se pueda descomponer en partes atómicas¹³, a las que sea posible atribuir en todo instante de tiempo una posición bien definida en el espacio. Esto se consigue *identificando* la *materia* con la *extensión*, de modo que lo inteligible¹⁴ de la materia es que está *compuesta de partes geométricas*.

Con este tipo de propiedades la mecánica clásica conseguía dar una descripción espacio-temporal bien definida de los cuerpos materiales. Pues, tanto el espacio y el tiempo como la materia se habían geometrizado de tal manera que el marco espacial se dividió siguiendo el esquema cartesiano del eje de coordenadas x , y , z , dentro del cual a todo cuerpo, o a su componente material, le correspondía una posición, y sólo una, exactamente determinada por los tres números de las coordenadas espaciales. En cuanto al tiempo, éste será meramente la variable t en función de la cual puede medirse el número de “instantes-unidades” que tarda un cuerpo en cambiar de coordenadas, es decir, en desplazarse de un punto a otro del espacio.

Estos cambios en su posición espacio-temporal se realizaban de tal forma que se podía trazar una trayectoria continua entre los puntos posicionales que recorre el móvil en su desplazamiento, pues no existía, como ya se verá más adelante, ningún impedimento teórico a la hora de asignar en los instantes t_1 y t_2 su posición espacial correspondiente:

“Con esas reglas y esos relojes se podrá, en todo instante señalado por los relojes, atribuir coordenadas exactas a todo punto material o referir exactamente la posición o la orientación en el espacio de un cuerpo sólido; más generalmente, se podrán representar todos los fenómenos por magnitudes bien localizadas en el espacio y en el tiempo. Se encontrará así la representación habitual de los fenómenos en física clásica; se llegará a concebir el espacio y el tiempo como una especie de

¹³ Con las características de indivisibilidad, impenetrabilidad, indestructibilidad, ingenerabilidad e inmutabilidad.

¹⁴ *Inteligible* es en el sentido de *matematizable*, y, según el paradigma racionalista de realismo científico de la época, es también *lo real*.

cuadro inmutable donde se localizan con exactitud y se desenvuelven inexorablemente todos los aspectos sucesivos del mundo físico”¹⁵.

Ahora bien, no sólo se trataba de una condición teórica, sino que, además, esto se correspondía con los hechos observados, puesto que, cuando observamos el movimiento de un cuerpo macroscópico, vemos como se desplaza de manera continua pasando por todos los puntos intermedios que componen su trayectoria desde un lugar a otro. Aunque esta “coincidencia empírica” no era decisivo: lo importante era que lo permitiera la teoría, ya que, por ejemplo, la ley de la inercia no se había observado nunca y, sin embargo, se la consideraba real. Por tanto, aquello que permite a la teoría trazar la trayectoria continua de un móvil, a través del marco espacio-temporal, es el hecho de tener unos cuerpos reducidos a sus puntos de gravedad, a los que se les puede atribuir en todo momento una posición bien definida dentro de su trayectoria, ya que la masa puntual de estos cuerpos coincide con el punto geométrico de la coordenada espacial.

Por otro lado, si aquello que se quiere estudiar son las causas de los cambios, se ha de recurrir a otro tipo de propiedades: éstas son las *propiedades dinámicas*, que darán cuenta de la evolución causal de los sistemas físicos y de sus características energéticas, o dinámicas.

c) La evolución dinámica de los sistemas físicos y el modelo de continuidad electromagnética

Una vez planteada la geometrización de la Naturaleza, a la física clásica le quedaba por explicar cómo se produce el movimiento y, ya que la materia ha quedado reducida a un conjunto de partes geométricas, no podemos encontrar en ella ninguna otra propiedad que sea la responsable de su movimiento.

Este problema lo resolverá Isaac Newton (1642-1727), el cual entenderá el movimiento de la materia a partir de sus relaciones externas, en las que intercambia cantidad de movimiento por razones extrínsecas a ella misma: la materia es pasiva, la causa de su movimiento será siempre la aparición de una fuerza que actúa sobre esta materia inerte, y que ha de vencer la resistencia de ésta a cambiar de estado¹⁶.

¹⁵ DE BROGLIE, L., *Física y Microfísica*, p. 138.

¹⁶ La materia se volvió inerte cuando la redujeron a extensión: la materia carece del movimiento espontáneo y de todo principio activo, como causa de sus cambios, que le atribuía

Entonces, si la causa del movimiento es esta fuerza, o energía¹⁷, las magnitudes que lo miden serán las que aluden al estado evolutivo de estos sistemas, tales como la energía en cualquiera de sus manifestaciones, ya sea térmica, eléctrica, potencial o cinética, y el impulso o cantidad de movimiento¹⁸. Sobre este tipo de magnitudes, Newton construirá su dinámica, en la que los movimientos se relacionan con las fuerzas que los producen, y cuyos valores se podrán determinar con la mayor precisión gracias a la aplicación de los principios clásicos de conservación de la energía y del impulso o cantidad de movimiento.

No obstante, el posterior desarrollo del estudio de este tipo de propiedades en el siglo XIX condujo a un concepto de energía entendido desde su *propio modelo explicativo*, que será distinto al de la materia corpuscular. Esto es, la energía, al igual que todas las magnitudes utilizadas en el electromagnetismo clásico, se entenderá desde el paradigma continuo que se utilizó en el siglo XIX para dar razón de la naturaleza de la luz.

La teoría ondulatoria de la luz se basaba en una analogía entre la luz y las ondas sonoras, según la cual la luz está constituida por ondas, las cuales se definieron como movimientos vibratorios propagados por el espacio. Su primer defensor fue Christiaan Huygens (1629-1695), que se opuso al modelo corpuscular de la luz que propuso Newton; sin embargo, no se aceptó hasta el siglo XIX gracias a los estudios de Thomas Young (1773-1829) y A. J. Fresnel (1788-1827). Para los defensores de esta teoría, una *onda* es el *lugar geométrico de los puntos donde la luz llega al mismo tiempo*.

Fue James Clerk Maxwell (1831-1879) quien explicó todos los fenómenos electromagnéticos, en los que también incluyó los luminosos, en términos ondulatorios como entidades de naturaleza energética. Por tanto, su comportamiento está regido no por las leyes de Newton sino por las llamadas "*ecuaciones de Maxwell*" (1865), en las que reunió las leyes de la

Aristóteles. La formulación de la ley de inercia es la expresión de esta pasividad: es la resistencia de todo cuerpo a cambiar de estado, la cual se calcula a partir de su masa inerte.

¹⁷ El término *energía* no se introdujo en la física hasta el siglo XIX; Newton hablaba simplemente de *fuerzas de interacción*.

¹⁸ El momento o cantidad de movimiento es el producto de la masa de un cuerpo por su velocidad, y el impulso es la fuerza por el tiempo. Sin embargo, ambas magnitudes son equivalentes en función de la fórmula $Ft=mv$, que se deriva de la segunda ley newtoniana del movimiento, por establecer la proporcionalidad entre la variación de la velocidad y la fuerza imprimida al móvil. Cf. SÁNCHEZ DEL RÍO, C., Los principios de la física en su evolución histórica, p. 37.

electricidad y el magnetismo descubiertas por Faraday, Gauss y Ampère. Son *cuatro ecuaciones diferenciales*:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho; \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0; \quad \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \delta \mathbf{D} / \delta t; \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\delta \mathbf{B} / \delta t$$

Dichas ecuaciones diferenciales se complementan con estas otras tres relacionales: $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$; $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$; $\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$.

Estas ecuaciones contienen todas las leyes conocidas sobre electricidad y magnetismo, que pueden resumirse así: 1) no existen polos magnéticos aislados; 2) las cargas iguales se repelen y las de distinto signo se atraen (ley de Coulomb); 3) puede haber un desplazamiento de la corriente eléctrica hacia otras fuentes del campo magnético, creando un campo de este tipo y, por su parte, los campos magnéticos también pueden producir una corriente eléctrica¹⁹. Como base conceptual de su teoría, desarrolló la noción de *campo electromagnético*, para lo cual partió de los estudios de M. Faraday sobre las “líneas de fuerza”. Este campo se propaga en forma de ondas, siendo éste el que vibra sin exigir ningún éter material:

“Maxwell fue capaz de demostrar que en todos los puntos de un haz luminoso existen sendas fuerzas, eléctrica y magnética, perpendiculares una a otra y a la dirección de propagación del haz luminoso. Esas fuerzas (o *campos*, según se denominan con más propiedad) oscilan muchos millones de veces por segundo y varían periódicamente a lo largo del haz, ...”²⁰.

De este modo, el *espacio* se convierte en un *campo dinámico de naturaleza ondulatoria y continua*: todo punto del campo posee una intensidad y una dirección, donde la intensidad guarda una relación de proporcionalidad con la energía del campo eléctrico.

“Las ondas propagándose con una velocidad de casi trescientos mil kilómetros por segundo en el espacio, no son más que las ondulaciones del campo electromagnético; las ecuaciones determinan para cualquier punto del espacio y cualquier instante del tiempo la estructura del campo”²¹.

Con el concepto de campo como un continuo dinámico aparece este otro modelo explicativo, distinto del atomismo que ofrecía la teoría

¹⁹ Cf. *Ibid.*, pp. 193-194.

²⁰ RAE, A., *Física cuántica: ¿Ilusión o realidad?*, p. 18.

²¹ PAPP, D., *La doble faz del mundo físico*, p. 53.

corpúscular de los *puntos-masa*, desde el que se entendía la naturaleza de todo aquello que no fuera materia²². Así pues, la física clásica consiguió mantener el equilibrio entre el modelo corpúscular y el ondulatorio, con los que explicaba, respectivamente, la materia y la energía:

“El concepto de corpúsculo permitía idealizar los objetos reales representándolos con un punto (y, por lo tanto, con una posición; un conjunto de posiciones constituía una trayectoria) y atribuyendo a ese punto una masa correspondiente a la cantidad de materia reunida (planeta o electrón).

En cuanto al concepto de onda o de campo, se refería no ya a un movimiento *de* la materia (como en la trayectoria de una bola) sino a un movimiento *en* la materia,” -comunicando- “su movimiento a sus vecinas: así, progresivamente se transmite energía y no materia”²³.

El primero servía de base a la explicación de la mecánica de Newton; el segundo a la teoría electromagnética de Maxwell. Por tanto, tenemos que durante esta época se estudiaron dos tipos de realidades: la materia y la energía; a las que les correspondía dos tipos de modelos explicativos: el modelo corpúscular de la teoría atómica para la materia, y el modelo ondulatorio de la continuidad electromagnética para el estudio de la radiación, que usaron los energicistas del XIX²⁴.

Pero, en el momento en que la radiación se explica desde la noción de onda, no se le puede atribuir la posición geométrica tan bien definida, que se le asigna a los corpúsculos puntuales en los que se ha dividido la materia; en cambio, lo que sí nos permite entender es la naturaleza y el comportamiento de la energía como *causa* de los cambios de estado de los cuerpos, y asignarles con toda exactitud sus características dinámicas de las

²² “Pero, para escribir sus ecuaciones, Maxwell se vio obligado a introducir una nueva hipótesis, que era en cierto modo una consecuencia natural del concepto de campo, y esta hipótesis le hizo descubrir una propiedad sorprendente: el campo electromagnético se propaga en forma de ondas. Y cuando a partir de su teoría calculó la velocidad de propagación de estas ondas en el vacío encontró que era de 300.000 Km/s, velocidad de propagación de la luz. (...) A pesar de todo, esta grandiosa síntesis de concepciones tan alejadas de las de Newton no fue acogida sin reticencias. No se impuso verdaderamente hasta que Heinrich Hertz confirmó las más notables de sus previsiones produciendo ondas (las ondas hertzianas) por medios puramente electromagnéticos y probando que eran tales y como Maxwell las había descrito”. ANDRADE E SILVA, J./LOCHAK, G., Los cuantos, pp. 43 y 46.

²³ ORTOLI, S./PHARABOD, P., El cántico de la cuántica, p. 24.

²⁴ Cf. HARMANN, Energía, fuerza y materia. La física del XIX.

cuales es directamente responsable. Por esta razón, se elaboró la siguiente clasificación conceptual en relación con ambos modelos:

“La tendencia general respecto a esta clasificación consistía en considerar a las sustancias materiales como la base natural de los fenómenos físicos, mientras que, por el contrario, los campos y radiaciones eran considerados más bien como esquemas mentales y modelos lógicos para representar la evolución de los primeros. Esta postura se adoptó muy especialmente después de que fracasara el intento de «sustanciar» el campo mediante el concepto de éter.

A cada uno de estos dos polos conceptuales se le atribuían algunas características propias. La materia se suponía constituida por *partículas*, y por tanto provista de una estructura *corpúscular* y *discreta*, y además *localizable* en una región circunscrita del espacio. Por el contrario los *campos* y *radiaciones* tenían naturaleza *ondulatoria* y *continua*, y debían pensarse como *extendidos* a todo el espacio y como portadores de *energía*”²⁵.

Con todos estos elementos, geométricos y dinámicos, la física clásica desarrolló el programa cartesiano de describir el mundo a través de figuras y movimiento, es decir, cumplió su objetivo de dar una descripción completa del estado de un sistema físico en la que se incluía la trayectoria espacio-temporal del móvil y el estado de su evolución dinámica, porque éste es el que indica cuál ha de ser su posición ulterior cuando el cuerpo cambia de posición o velocidad según la magnitud de la fuerza que ha intervenido para hacerle cambiar de estado.

Para que este tipo de descripción mecánica, que a veces coincide con los hechos observados y otras veces no, tuviera una garantía teórica desde la que afirmar su objetividad, realidad, veracidad (o como queramos llamarlo) se construyó un determinado marco conceptual, desde el que poder dar una razón, explicación o justificación, de la aplicabilidad de estas teorías clásicas a la experiencia.

1.2) Los Postulados del Marco Clásico para la Descripción Física

Ya he dicho que, en este programa racionalista de matematización de la experiencia, jugó un papel esencial el refinamiento de los conceptos de nuestra experiencia ordinaria, a partir del cual se estableció el modo

²⁵ AGAZZI, E., Temas y problemas de la filosofía de la física, p. 301.

como se aplican a aquella experiencia matematizada. Asimismo, el tipo de uso de las magnitudes físicas que estos conceptos posibilitan también requirió el mismo proceso de abstracción, que se realizó en función de ciertos postulados teóricos²⁶. A continuación, desarrollaré el análisis de éstos, el cual conducirá a descubrir los elementos que se daban en el marco de la física clásica que hicieron posible la afirmación del ideal descriptivo y explicativo de la ciencia moderna²⁷.

En la medida en que éstos se han revelado como postulados clásicos y han sido cuestionados por la física cuántica, su análisis ayudará a comprender la causa de por qué han perdido parte de su significado los conceptos y los ideales clásicos en el nuevo marco de la física actual. En total son *cuatro postulados* y *cuatro ideales descriptivos*: la continuidad clásica, el representacionismo pictórico, la independencia de las propiedades dinámicas y cinemáticas, el isomorfismo entre los niveles descriptivos, el ideal de descripción física, de observación, de objetividad y de determinismo o predictibilidad causal. Adelantaré que, al marco conceptual propio de las teorías clásicas, Bohr le llamó “el marco de la causalidad”, debido a que su característica principal es la de propiciar el ideal descriptivo clásico: la absoluta predictibilidad causal de los fenómenos naturales.

“Ante todo, los principios de la mecánica newtoniana significan un esclarecimiento trascendental del problema de causa y efecto, que permite, partiendo del estado de un sistema físico definido en un instante dado mediante magnitudes medibles, predecir su estado en cualquier

²⁶ La mayoría de ellos no explicitados porque eran puntos de partida, cuya función era formar parte de la base explicativa y no el ser explicados.

²⁷ La tendencia actual es denominar “principios filosóficos” a estos postulados, cuya siguiente clasificación fue realizada por los propios físicos, como de Broglie o Bohr. Es un análisis global, cuyos puntos no siempre son asumidos dentro de todas las teorías concretas que conforman el llamado “marco clásico”, pero su aceptación mayoritaria sirve para delimitar las diferencias de éste con el nuevo “marco de la complementariedad”. Físicos contemporáneos, como el francés Roland Omnès, prefieren clasificarlos de otro modo, aún más general, a partir de estos cinco principios: el de inteligibilidad (lo pensable es representable), el de identidad (un objeto A no puede ser a la vez A y su contraria, $\neg A$), el de localidad (todo objeto ocupa un lugar en un instante determinado), el de causalidad (todo efecto tiene su causa) y el de separabilidad (todo objeto espacialmente separado de otro es físicamente independiente, sin que exista correlación alguna entre ellos). Cf. OMNÈS, R., “Una nueva interpretación de la mecánica cuántica. Obtener la física clásica sin admitir otra cosa que las leyes cuánticas”, *Mundo científico*, **163**, diciembre 1995, pp. 1034-1040. Aquel último principio no se explicitó hasta los análisis posteriores que se hicieron sobre el artículo que escribieron Einstein, Podolsky y Rosen en el año 1935.

instante posterior. Se sabe que este tipo de descripción determinista, o causal, condujo al concepto mecánico de la naturaleza y vino a representar un ideal de explicación científica en todos los dominios del conocimiento, sin distinción del camino mediante el cual se obtuvo tal conocimiento. Por eso es importante que el estudio de campos más amplios de la experiencia física haya revelado la necesidad de una discusión más profunda del problema de la observación”²⁸.

¿Cómo llegó la física clásica a ese tipo de descripción determinista? ¿Por qué Bohr la identifica con la descripción causal? ¿En qué consiste su ideal de explicación científica? ¿Y qué relación guarda todo esto con el “problema de la observación”? En lo que sigue analizaré las características del marco clásico, que permitieron que tal ideal descriptivo se aplicara a la Naturaleza, y en cuyo desarrollo se encuentran las respuestas a estas preguntas.

a) La continuidad de las conexiones causales en la Naturaleza

La física clásica supuso que la *Naturaleza no da saltos*, es decir, que los sistemas físicos evolucionan causalmente y esta evolución es siempre continua. Esta afirmación es el pilar básico que sustentará, a modo de pirámide invertida, todo el edificio de la física clásica porque es aquello que va a servir de garantía a los ideales de objetividad, observación (representación pictórica y determinismo), sobre los que se construyó el tipo de conocimiento científico que asume el marco clásico.

“Desde Newton la imagen física del mundo basábase en la convicción de que todas las conexiones causales son continuas en la naturaleza. El cálculo diferencial, inventado por Leibniz y Newton para dar forma adecuada a las leyes físicas, fue la expresión matemática de esta convicción. *Natura non facit saltus*”²⁹.

Con las ecuaciones diferenciales e integrales del cálculo infinitesimal se pudo respaldar la exigencia, que este postulado establece, acerca de la transición continua de unos estados a otros, esto es, que aquélla se realice siempre pasando por todos los estados intermedios, sin

²⁸ BOHR, N., “Unidad del conocimiento” (1954), en: Física atómica y conocimiento humano, p. 85.

²⁹ PAPP, D., La doble faz del mundo físico, p. 60.

que exista un valor mínimo o indivisible para impedir que se rompa la continuidad³⁰. Porque el curso de los fenómenos, descrito por estas ecuaciones diferenciales, permite asignar incrementos o disminuciones infinitamente pequeños a los valores de las magnitudes que intervienen en él.

De modo que, si las operaciones de la Naturaleza se desarrollan de forma continua, las magnitudes que intervienen en las ecuaciones diferenciales, para describir esta evolución, han de ser magnitudes a las que se les pueda atribuir valores en una escala continua³¹, con el objetivo de que describan fielmente el cambio de estado propio de los sistemas físicos en esta evolución causal. Así se obtiene que este postulado actúe como garantía del ideal clásico de observación, ya que la independencia del conocimiento científico de todo proceso de observación y medida depende de si se consigue o no ignorar las condiciones de la observación, eliminando el valor de la perturbación que se ha *provocado* en el sistema al medirlo.

“Esta noción de observación en sentido clásico, que permite obtener información del objeto tal cual es, constituye pues una idealización, por cuanto, siempre se altera el estado de los objetos observados, pero una idealización válida desde el momento en que la interacción con los aparatos de medida es perfectamente controlable, calculable y eliminable”³².

Ahora bien, aunque siempre se ha admitido que todo proceso observacional supone una interacción entre los instrumentos de medida y los objetos observados, que produce una perturbación en el estado físico de estos últimos, la cuestión está en si medimos aquélla en términos de magnitudes continuas o discontinuas, pues éstas serán las que nos ofrezcan las posibilidades y condiciones de la observación, al permitir o no reducir

³⁰ El cálculo infinitesimal fue desarrollado por Newton y por Leibniz antes del año 1700 casi simultáneamente y de forma independiente, y consiste en dos tipos fundamentales de ecuaciones: las diferenciales y las integrales. La función diferencial de una variable x es la porción infinitamente pequeña en que aumenta o disminuye la variable. La función integral sirve para sumar un número infinito de cantidades infinitesimales; es la suma de las diferenciales.

³¹ Ésta es la clase de continuidad, sobre la que volveré más adelante, que utiliza la mecánica y la electrodinámica.

³² RIOJA, A., “La filosofía de la complementariedad y la descripción objetiva de la naturaleza”, p. 259.

al máximo la perturbación de la medida y calcularla con la mayor precisión, con el fin de poder ignorar las condiciones experimentales, como requiere el ideal clásico de observación:

“Si la perturbación originada por la observación se mide en términos de magnitudes continuas, puede al menos ser arbitrariamente reducida tanto como se quiera y, por tanto, puede ser despreciable. Lo importante no es si experimentalmente puede ser igualada a cero, sino si, conforme a los principios de la teoría, nada se opone a su reducción indefinida al no estipularse una cantidad mínima de acción o de energía”³³.

Ciertamente, en física clásica el valor de la interacción observacional puede ser ignorada por tres razones. La primera es que la perturbación causada se puede despreciar por tener un valor tan pequeño, que resulta insignificante en relación con los grandes números que se manejan en los fenómenos mesocósmicos y macroscópicos. En segundo lugar, el valor perturbador se puede calcular con exactitud, ya que puede ser aislado de cualquier otra interacción; de modo que, se lo podemos descontar del valor obtenido en total para hallar el valor original independiente de la medida. Tercero, también se puede reducir infinitamente desde la teoría, dado que la magnitud con la que se mide la perturbación es continua.

A los físicos de entonces no les importaba que en la práctica no se consiguiera, porque de ocurrir esto no sería un problema de la teoría, sino sólo experimental. Además, como el racionalismo científico de la física clásica parte de que lo real es todo lo que estipula la teoría, entonces no sería un problema de la realidad, sino de nuestro conocimiento limitado por las imperfecciones de nuestros instrumentos experimentales, pero nunca a causa ni de una posible imperfección de la teoría, ni tampoco de la realidad, pues ambas coinciden en este modelo de racionalismo en el que la última ha sido idealizada por las condiciones de la primera.

Esta última razón es la más importante porque es la que permite ignorar las condiciones experimentales *de derecho*, y no sólo *de hecho*, y es la que dará validez a las otras dos, sobre todo a la segunda. Porque sólo si la perturbación puede ser arbitrariamente reducida, podemos asignar un valor exacto a las magnitudes que pretendemos medir, ya que, para calcular este valor, es necesario el poder aislarlo de cualquier otra interacción posible con el sistema de medida que estemos utilizando. En consecuencia,

³³ *Ibid.*

el científico justificará este hecho³⁴, con el que se encuentra en la práctica, porque la teoría supone la continuidad de las magnitudes físicas, que representa la continuidad de las transiciones energéticas, lo cual posibilita el ideal clásico de observación al poder reducir infinitamente el valor de la interacción observacional.

Aun más, esto también fue lo que permitió hablar de los sistemas físicos como “sistemas cerrados” o, como también se les definió, “independientes de la observación”, ya que se les considera aislados de toda interacción exterior, tanto si ésta proviene de otros cuerpos como si se trata del proceso mismo de observación y medida. Aunque, en realidad es un argumento circular: es posible hablar de sistemas aislados porque cualquier interacción, que nos impida el conocimiento directo del estado del sistema observado, puede ser indefinidamente reducida hasta ser tan pequeña que, tendiendo a cero teóricamente, sea despreciada; asimismo, puede ser de esta forma despreciada porque el sistema se puede considerar aislado de este tipo de interacciones. Por tanto, el fundamento de esta argumentación no se encuentra en la experiencia, sino en el *postulado* que la teoría establece acerca de los *intercambios energéticos, que se realizan siempre de manera continua*.

De esta manera, el conocimiento que el científico obtiene de la Naturaleza es independiente de él y de sus métodos, ya que aquél sólo depende del objeto mismo, en el que el sujeto no se incluye, debido a que sus procedimientos de observación y medida no le afectan significativamente, como acaba de verse, gracias al postulado de la continuidad, sino, todo lo contrario, el sujeto se distancia del objeto, estableciéndose una clara distinción entre uno y otro. Por este motivo, de Broglie se expresa del siguiente modo:

“Nos parece que un primer postulado de esta clase es el siguiente: debe ser posible llegar a una descripción del mundo material que de ninguna manera se preocupe ni del sabio que experimenta y que razona, ni de los medios de investigación de que se sirve para observar los fenómenos. (...) nuestros medios de observación y el hecho de utilizar necesariamente fenómenos susceptibles de ser directamente percibidos por nuestros sentidos, nos permiten trazar un cuadro verdaderamente objetivo, exacto y unívoco de lo que sucede en el mundo material...”³⁵.

³⁴ El de poder ignorar las condiciones experimentales de la observación, haciendo que el valor de la interacción observacional, y de cualquier otro tipo de interacción, tienda infinitamente a cero.

³⁵ DE BROGLIE, L., *Física y Microfísica*, p. 128.

La distinción entre el sujeto que observa y el objeto observado no sólo es lícita, sino que, además, viene demandada por el propio ideal clásico de descripción objetiva: aquello que Margenau ha llamado *el ideal descriptivo de la doctrina del espectador*³⁶, donde el sujeto es un mero espectador de la realidad en la que él no se incluye. El científico es un observador imparcial e inocuo porque cuando observa los objetos materiales no altera la situación de su estado físico.

Sin embargo, para que el ideal de observación realice tal demanda es necesario suponer la evolución continua en las operaciones de la Naturaleza, pues es lo que hace posible desde la teoría que tal ideal se lleve a cabo³⁷. Así pues, el postulado fundamental, que subyace en todo lo anterior, es el de la continuidad de las conexiones causales en la Naturaleza durante sus intercambios energéticos. A partir de éste, se podrán afirmar aquellos ideales de observación y de objetividad, que aseguran la clara distinción entre sujeto y objeto, sobre la cual, a su vez, descansan los elementos básicos de la concepción realista, que defiende la teoría clásica: la noción de realidad independiente y el representacionismo de los conceptos físicos.

En definitiva, *el marco clásico propone que una descripción objetiva ha de describir al objeto a través de una serie de propiedades que sólo le corresponden a él y que nada tienen que ver con el científico ni con sus observaciones; la descripción objetiva es la que siempre se refiere a la realidad física independiente del sujeto*. De esta forma, es el ideal clásico de observación³⁸ el que determina la posibilidad de defender un concepto de “objetividad” vinculado a la noción de *realidad física independiente* y de construir un lenguaje pictóricamente representativo que se adecua perfectamente a ella, además de justificar la independencia de las propiedades dinámicas y cinemáticas³⁹.

³⁶ Cf. MARGENAU, H., La naturaleza de la realidad física.

³⁷ “Hasta el siglo XX el concepto de observación es considerado por los científicos como primitivo en el sentido de no estar en función de ningún otro, cuando en realidad depende estrechamente del uso que en mecánica se hace del par de conceptos continuo-discontinuo”. RIOJA, A., “La filosofía de la complementariedad y la descripción objetiva de la naturaleza”, p. 259.

³⁸ En concreto, gracias a la posibilidad de hablar de los sistemas físicos como *sistemas cerrados*.

³⁹ Lo cual garantiza que se pueda obtener una descripción completa de estos sistemas, como expondré a continuación.

En este último aspecto será en el que me detendré a continuación para comprobar que el modelo de continuidad, que subyace en la noción clásica de observación, es el responsable último de la independencia de ambos tipos de propiedades mecánicas, haciendo del cálculo diferencial su instrumento matemático.

En el siguiente párrafo, analizaré cómo se podía dar una descripción cinemática de un móvil, sin tener que precisar los elementos dinámicos de su movimiento, porque el marco espacio-temporal era independiente de los movimientos que se realizaban en él y por esto se las podía combinar en una única descripción completa del sistema.

No obstante, esta independencia del marco espacio-temporal era un postulado sostenible sólo porque cualquier posible perturbación en él podía ser infinitamente reducida, ya que todas las acciones de la naturaleza obedecían a la regla de la continuidad y, por tanto, podían someterse al cálculo diferencial. Por ello, al tener un cuadro espacio-temporal invariable, en física clásica se podía fijar la posición de un móvil por referencia a la posición de un cuerpo sólido, tomado como sistema de referencia fijo para trazar las coordenadas cartesianas.

b) La independencia entre las propiedades geométricas y las propiedades dinámicas

El campo de estudio de la Mecánica se compone de dos partes: la *cinemática* y la *dinámica*. La primera es el estudio del movimiento cinético de la materia desde el punto de vista meramente geométrico, sin atender a las causas de ese movimiento, sólo en función del espacio, tiempo y velocidad; la segunda introduce en su explicación aquellas causas responsables del movimiento de los cuerpos y lo hace hablando en términos de fuerzas.

En mecánica clásica la dinámica incluye a la cinemática, siendo ésta la base de la dinámica, pues, a partir de los datos de las propiedades cinemáticas, pueden construirse las magnitudes dinámicas, tales como *cantidad de movimiento* ($m \cdot v$) o *impulso* ($F \cdot t$) y *energía*, por ejemplo, *energía cinética* ($1/2 m \cdot v^2$) y *potencial* ($m \cdot g \cdot h$).

Esto es así porque podemos conocer todos los datos de la descripción cinemática haciendo abstracción de las magnitudes dinámicas que determinan las causas del movimiento, ya que éstas no afectan a las coordenadas cinemáticas del móvil; es decir, hay una independencia física del marco espacio-temporal respecto de todos los movimientos que se dan

en él, por ello es posible calcular ambos tipos de magnitudes por separado⁴⁰.

Se ha visto ya que el marco clásico tiene la peculiaridad de permitir una descripción objetiva del mundo material, la cual descansa sobre la noción clásica de observación. Pero, además, cumple la exigencia de ser exhaustiva, o completa, al tratarse de una descripción que abarca tanto las propiedades dinámicas como las geométricas, es decir, puede dar una explicación causal, en función de las primeras, al tiempo que una descripción espacio-temporal, por medio de las segundas. Ésta es la razón de que Bohr denomine *marco de la causalidad* al marco conceptual propio de las teorías clásicas; tales características de completud y objetividad es lo que determina el ideal descriptivo clásico.

Entonces, con el fin de trazar aquel “cuadro verdaderamente objetivo, exacto y unívoco” del mundo material, las teorías clásicas supusieron la posibilidad de precisar simultáneamente todas las coordenadas en el espacio y en el tiempo y todo el encadenamiento causal responsable de la evolución dinámica de los sistemas físicos. Con la conjugación de ambos tipos de propiedades se conseguía dar a la teoría la posibilidad de *seguir ininterrumpidamente la trayectoria* espacio-temporal de cualquier móvil y *su evolución causal*.

“Pensábase que toda la evolución del mundo físico debía representarse por magnitudes localizadas en el espacio y variando en el curso del tiempo. Estas magnitudes debían permitir describir íntegramente el estado del mundo físico a cada momento, y la descripción íntegra de la naturaleza podría realizarse así por figuras y movimientos siguiendo el programa de Descartes. Esta descripción se efectuaría íntegramente con ayuda de ecuaciones diferenciales o a derivadas parciales, permitiendo seguir la localización y la evolución en el curso del tiempo de todas las magnitudes que definen el estado del mundo físico”⁴¹.

⁴⁰ En cambio, en mecánica cuántica las magnitudes dinámicas no pueden ser construidas a partir de las cinemáticas porque éstas han perdido su sentido al no mantenerse aquella independencia del marco espacio-temporal: más adelante se comprobará que en la nueva física se ha de recurrir a la frecuencia para conocer la energía ($\varepsilon=h\cdot\nu$) y a la longitud de onda para conocer la cantidad de movimiento o el impulso ($p=h/\lambda$). Es cierto que tanto la frecuencia, por ser la inversa del periodo (tiempo que tarda en pasar una onda), como la longitud de onda, que es una medida espacial (la distancia entre dos ondas), pueden considerarse datos espacio-temporales pero no se olvide que son magnitudes ondulatorias y no corpusculares y que, por tanto, no pueden definirse desde el materialismo atomista.

⁴¹ DE BROGLIE, L., *Física y Microfísica*, p. 128.

De nuevo aparece el cálculo infinitesimal⁴², cumpliendo ahora la tarea de asignar cantidades variables a las propiedades de estos cuerpos y establecer sus valores correspondientes en forma de funciones, lo cual le convierte en el instrumento matemático más útil que tuvo la mecánica para describir el movimiento de aquéllos, pues antes de él la matemática sólo podía asignar números y figuras, pero no funciones correlativas entre ellos, las cuales simbolizan el movimiento.

Aun más, para que la exigencia del ideal de una descripción completa del estado físico de los sistemas se considere factible, se ha de suponer la independencia de las propiedades geométricas y dinámicas⁴³. Es decir, para que ambos tipos de magnitudes permitan una descripción completa, de todos los estados del mundo físico, debe poder establecerse el valor de estas propiedades de forma independiente, con el fin de que las mediciones efectuadas no interfieran significativamente entre sí; y éste es el contenido del otro postulado clásico, conocido ahora como el de la independencia física entre las propiedades dinámicas y geométricas.

En otras palabras, se podía dar una descripción cinemática de un móvil sin necesidad de acudir a los elementos dinámicos de su movimiento porque ambas descripciones eran independientes entre sí. Razón por la cual se podían combinar en una única descripción completa del sistema, una vez habían sido obtenidos sus valores por separado.

Esta exigencia descriptiva se cumplía de tal modo que el marco espacio-temporal carecía de efectos sobre las propiedades dinámicas de los cuerpos que contiene, y viceversa, debido a su mutua independencia física. Por tanto, se les podrá aplicar sin restricción alguna los principios clásicos de conservación, para determinar su energía o su impulso, al tiempo que su

⁴² “La gran importancia del cálculo diferencial en física se basa en que frecuentemente puede describirse el curso de los fenómenos por relaciones entre diferenciales (es decir, entre incrementos pequeñísimos) de las magnitudes que intervienen, es decir, por ecuaciones entre diferenciales (...). Escritas estas ecuaciones pueden hallarse las relaciones entre las propias magnitudes si se encuentran funciones que la satisfagan”. SÁNCHEZ DEL RÍO, C., Los principios de la física en su evolución histórica, p. 45.

⁴³ Son independientes porque ninguna de las dos necesita a la otra para determinar el valor de sus magnitudes: “Para localizar un objeto en el espacio, no había necesidad de precisar su movimiento y su velocidad; podía afirmarse que había pasado a tal posición en el instante t en un sistema de referencia bien definido sin tener que preocuparse de su energía. Para emplear las expresiones cartesianas, la figura y el movimiento parecían cosas de todo punto independientes, datos que *a priori* ninguna condición vinculaba uno al otro”. DE BROGLIE, L., Física y Microfísica, p. 135.

localización bajo las coordenadas espacio-temporales a través de la observación, ya que, como acabo de exponer, las posibles interacciones que se producen para hallar tales valores pueden ser ignoradas.

A estos tipos de magnitudes, Hamilton las denominó “canónicamente conjugadas” porque, aunque independientes, ambas son necesarias para dar una descripción completa del sistema; las cuales se agrupan en dos pares fundamentales: energía-tiempo y posición-impulso o momento.

En consecuencia, la física clásica, en términos generales, pudo construir un marco conceptual en el que se podía prever el movimiento de cualquier punto material, porque nada se oponía al conocimiento simultáneo y preciso de su posición y su tendencia dinámica en un mismo instante inicial, aportando la condición necesaria para aplicar a la realidad el modelo clásico de descripción determinista.

Así, conocidos estos datos, y utilizando las ecuaciones diferenciales, se obtenía una previsibilidad perfecta de los fenómenos naturales que, en teoría, llevó a una concepción determinista del mundo físico, en la cual la noción de sucesión causal en el espacio y en el tiempo era perfectamente viable. Con estas palabras describe de Broglie tal situación:

“En mecánica clásica, para poder prever el movimiento de un punto material, es necesario conocer exactamente su posición y su velocidad en un mismo instante inicial; es preciso, pues, poder precisar con exactitud en ese instante inicial su localización espacial y su tendencia dinámica. Con las ideas clásicas, nada se opone a que estos datos iniciales sean conocidos y, por lo tanto, nada se opone a una previsión rigurosa del movimiento ulterior conforme al ideal determinista”⁴⁴.

Además, desde la independencia de los aspectos geométricos y dinámicos, se pudo afirmar que, si el espacio no afectaba al movimiento ni a la evolución continua de los cuerpos que contenía, el tiempo, entendido como sucesión, tampoco interfería en los acontecimientos que se dan en él; con lo cual se consigue que el vínculo de la relación causal tenga un carácter reversible, ya que nada impide ir del efecto E a la causa C como se fue de la causa al efecto.

Así pues, eliminada la asimetría temporal del vínculo causal, puede reconstruirse todo el encadenamiento pasado y futuro de cualquier sistema

⁴⁴ DE BROGLIE, L., Física y Microfísica, p. 146.

cerrado, una vez conocidas sus condiciones iniciales, y describir todas sus propiedades simultáneamente aplicando los principios de conservación, debido a que ninguna se vuelve incompatible, al poder establecerse de forma independiente unas de otras.

Razón por la cual el determinismo físico, de la predictibilidad causal, acabó derivando en el determinismo metafísico, de la predeterminación, enunciado por Laplace.

“(…) el principio determinista, según el cual el comportamiento futuro del universo está rigurosamente gobernado por leyes físicas, parece ser, sin duda, una consecuencia directa de la manera de pensar iniciada por Newton. En palabras del científico y filósofo francés del siglo XIX Pierre Simon de Laplace, «podemos ver el estado presente del universo como un efecto de su pasado y como la causa de su futuro»⁴⁵.

c) El representacionismo pictórico

El hecho de que el campo de aplicación de la física clásica se sitúe en el nivel mesocósmico le lleva a estudiar fenómenos que se muestran directamente a nuestra percepción inmediata, lo cual propicia una concepción ingenuamente realista de la ciencia⁴⁶ y un determinado ideal de *representabilidad teórica*, basado en la noción de *realidad física independiente* y en el ideal de objetividad. Comenzaré este subapartado enlazándolo con lo dicho anteriormente: aquellos conceptos básicos que utiliza la mecánica, aunque tuvieron que pasar por el tamiz de la teoría, se sacaron directamente de la experiencia cotidiana. Entonces aún no había razones para sospechar que el lenguaje ordinario, debidamente refinado por las leyes físicas que se estaban descubriendo, no fuera capaz de representar, con absoluta precisión, todos los fenómenos naturales. Bajo el postulado racionalista de los conceptos mecánicos como representaciones objetivas de la realidad, la física clásica pudo establecer que el conocimiento que éstos ofrecen del mundo físico es preciso y unívoco:

⁴⁵ RAE, A., *Física cuántica: ¿Ilusión o realidad?*, p. 17.

⁴⁶ Concepción que se suele llamar *realismo científico*, (cuyo origen se remonta hasta el siglo XVI, cuando reapareció la idea platónica de la armonía del Universo). Se diferencia del *realismo ingenuo* en que éste incluía dentro de la base explicativa de *lo real* a los fenómenos cualitativos, mientras que el primero sólo trata de esta forma a los fenómenos cuantitativos, o matematizables. Pero ambos realismos son ingenuos en el sentido de acrílicos, pues parten de él como un supuesto primario indubitable.

“... pero el científico, que siempre admite más o menos implícitamente la realidad del mundo exterior, puede muy bien pensar, aun cuando tenga bastante espíritu filosófico para recordar siempre que toda ciencia está a nuestra medida, que pueda existir una correspondencia exacta y unívoca entre el mundo exterior y la imagen que llegamos a representarnos. Admitirá entonces que las observaciones o las experiencias efectuadas con suficiente habilidad y precisión llegarán siempre a hacernos conocer con exactitud todas las magnitudes que son necesarias para una descripción completa, si no del mundo material en su integridad, por lo menos de algunos fenómenos que en él se desarrollan. (...) Puede entonces esperarse, y éste es uno de los postulados de la ciencia clásica, poder llegar a expresar, evidentemente en lenguaje humano, pero, sin embargo, en forma perfectamente precisa, la evolución en el curso del tiempo de todo cuanto sucede en el espacio que nos rodea”⁴⁷.

De este texto de de Broglie he tomado la *definición de representación pictórica*: aquélla donde se supone una correspondencia exacta y unívoca entre el mundo exterior y la imagen que llegamos a representarnos. Dicho de otro modo, es *aquella representación en el espacio de la intuición, que, al coincidir con el tipo de espacio que maneja la geometría euclídea permite hablar de “pintar”, “figurar” o “visualizar, objetos en el espacio*. Esta representación fue usada en el marco clásico para describir espacio-temporalmente los sistemas físicos; por ello, volveré a ella cuando analice, en el tercer capítulo, “el fracaso de la descripción física como representación pictórica”.

Pero, en realidad, cuando se habla de “representabilidad pictórica” he de hacer una salvedad: me refiero, más bien, a una “representación isomórfica” con respecto al marco espacio-temporal. Es cierto, como advierte Jammer, que para pintar necesitamos colores y, sin embargo, este tipo de representación no tiene nada que ver con los colores ni con cualquier otro tipo de cualidad secundaria. Por lo general esta expresión se refiere a un tipo de representabilidad ostensiva en el espacio y en el tiempo, la cual implica que la realidad se manifiesta, espacio-temporalmente, tal y como es porque el concepto y el objeto comparten la misma estructura (o forma) espacio-temporal; de ahí que las propiedades mecánicas de los

⁴⁷ DE BROGLIE, L., *Física y Microfísica*, pp. 128-9. Un poco más adelante continúa diciendo: “... lo que es preciso admitir es que con sus coordenadas de espacio y de tiempo, la física matemática clásica estaba en condiciones de representar de una manera precisa la sucesión de los fenómenos que alrededor nuestro permiten comprobar nuestros sentidos”.

conceptos teóricos se consideren en física clásica como propiedades de los objetos reales⁴⁸. Razón también por la cual la definición de “descripción pictórica” se refiere a una *descripción objetiva* de la realidad física *en términos espacio-temporales*.

Ahora bien, según las distintas ramas de la física, tal descripción pictórica puede cambiar de matices. En mecánica clásica, este tipo de descripción representaba el movimiento de la materia, siguiendo el *ideal geométrico cartesiano*. Ahora bien, más allá de la Mecánica, en física clásica el término “pictórico” se amplía con el modelo de campo, que introducen los energicistas, hasta alejarse de la representación cartesiana de figuras geométricas en movimiento. En otras ramas de la física, que no son Mecánica, como es el caso del Electromagnetismo, prevalece el llamado “*ideal maxwelliano*” de representación pictórica. Éste mismo será desarrollado y, a su vez, nuevamente ampliado por Einstein hasta abarcar la descripción geométrica no-euclídea del marco espacio-temporal donde se inscriben los fenómenos físicos. Es decir, la descripción pictórica se entiende, fuera del contexto de la Mecánica, como la representación del movimiento de la materia a partir de la noción de *campo* con una estructura métrica no-euclídea, aunque en ella puede incluirse la euclídea como un caso ideal. Pero, en cualquiera de estos casos hay un elemento común, que es aquello que caracteriza a la representación pictórica del marco clásico: los fenómenos físicos acontecen dentro de un marco espacio-temporal real, en función de lo cual podemos tener una representación espacio-temporal objetiva de aquéllos. Así lo declara Schlick:

“Imaginar «pictóricamente» significa representarse en la imaginación las percepciones que uno tendría si observara o retuviera la estructura directamente. Para que esto sea posible, la estructura no ha de ser ni

⁴⁸ Cito a Jammer: “It is commonly claimed that classical physics, in contrast to modern physics, provided a visualized model of physical reality. Strictly speaking, this is not true. For as soon as the atom was regarded as endowed with only shape, position, and motion and divested, for example, of color, the methodological gain in intellectual unification was paid for by the loss of visualizability or picturability. In fact, how could a colorless object be «pictured»? If we speak of the «picturability» of Newtonian physics, we use this term in a more «pallid» and abstract sense: we mean that those properties which presumably «do really exist in the bodies themselves» can be presented by geometrical-kinematical models whose colors (and other secondary qualities) are completely irrelevant to the purpose for which they were designed, as, for example, to serve as didactic aids in the instruction of mathematics”. JAMMER, M., The conceptual development of quantum mechanics, p. 403.

demasiado grande ni demasiado pequeña y, en cualquier caso, debe ser una estructura espacial”⁴⁹.

Otra forma de plantear esto es la que realiza González Recio, comentando a Schlick:

“La ciencia clásica de la naturaleza se había consolidado bajo el supuesto de que las magnitudes con que operaba obtenían su significado de imágenes sensoriales. El movimiento parecía ser la clase de proceso donde las exigencias del conocimiento eran satisfechas de una forma pictórica, donde el proceso completo quedaba recogido con plenitud en su representación visual. Este había sido –en opinión de Schlick- el único motivo de la predilección de los físicos por las explicaciones mecánicas, y de los intentos de reducir a ellas los demás tipos de explicación. Ahora bien, imaginar pictóricamente no es sino concebir estructuras espaciales”⁵⁰.

Gracias al vínculo de este *representacionismo pictórico* de las nociones clásicas con la realidad extralingüística, se pudo tender el puente entre la teoría y la experiencia, desde el cual se elaboró el lenguaje intuitivo⁵¹ que es propio de las descripciones visuales en el espacio y en el tiempo ordinarios, a las que nos acostumbró la física clásica. Este lenguaje ofrece la posibilidad de describir los objetos materiales del mundo físico tal y como son ellos mismos, independientemente del sujeto que los observa, cumpliendo la demanda del ideal de objetividad, porque se pudo suponer que las propiedades geométricas y dinámicas de los fenómenos físicos son las propiedades reales que los objetos poseen en sí mismos.

Consecuentemente, el realismo clásico pudo defender una noción de *realidad física independiente* porque la información que los instrumentos de medida ofrecen acerca del objeto es una información estrictamente propia de él. Así esta noción de *realidad física independiente* actúa como objeto de estudio de la ciencia y desde ella se postula que el sistema observado es totalmente independiente y distinguible de los aparatos

⁴⁹ SCHLICK, M., *Filosofía de la naturaleza*, p. 42. Ver también, pp. 38-41.

⁵⁰ SCHLICK, M., *Filosofía de la naturaleza*, p. 9 (Introducción de J. L. González Recio). Ediciones Encuentro, Madrid, 2002.

⁵¹ “Intuitivo” no en el sentido kantiano de intuición pura, sino, todo lo más, en el sentido de intuición empírica.

de medida del científico: objetividad y realismo están unidos dentro del programa racionalista de la ciencia clásica⁵².

d) El postulado del isomorfismo entre los niveles físicos

Aún queda por mencionar el otro postulado que el marco clásico asume desde su base: el isomorfismo entre los niveles descriptivos de la física clásica. Este supuesto se encarga de construir un puente entre los niveles microfísico y mesofísico, que el marco clásico necesita para llevar el tipo de descripción clásica, que he analizado, a la escala de las partes constitutivas de los cuerpos macroscópicos y, de esta forma, mantener los mismos conceptos físicos en ambos niveles. Porque, una vez entendida la materia de forma discontinua y descompuesta en partes elementales, se ha de postular este paralelismo entre ella y sus constituyentes, con el fin de que éstos expliquen el comportamiento del compuesto material desde el mismo esquema conceptual.

Esta extrapolación la realiza suponiendo que no hay diferencias cualitativas entre ellos y, por tanto, el microcosmos inobservable se rige por las mismas leyes que el mundo mesofísico de nuestras percepciones, cuyo comportamiento se explica a partir de unas hipotéticas partículas, que no vemos ni conocemos directamente, pero que, *suponemos*, actúan igual que su compuesto mesocósmico, porque han de ser la explicación de éste.

En definitiva, el modelo explicativo del átomo asumió que todo aquello que no conocemos y que no podemos observar se comporta exactamente del mismo modo que aquello que sí conocemos y observamos. Ésta era su doctrina de la *Unidad del Universo*: todos sus niveles unidos en una perfecta similitud entre ellos⁵³.

Tal postulado fue el más explícito de todos ellos, pero se pudo mantener, hasta el fin de la era clásica, porque, aun tratándose de una mera convención, ésta no introducía ninguna incoherencia en el marco clásico; es más, no había ningún motivo, ni físico ni lógico, para pensar que lo inobservable fuera distinto de lo observable. De modo que este supuesto no sólo venía avalado por el sentido común, sino también por el principio

⁵² En su momento explicaré cómo Bohr propone una separación de ambos términos: para salvar la objetividad de la descripción cuántica, hará de ella una cuestión de lenguaje y no de realidad. No obstante, al actuar así, pondrá en entredicho el realismo de la ciencia, el cual deberá recuperarse por otra vía.

⁵³ Cf. PAPP, D., La doble faz del mundo físico, p. 68.

de simplicidad y economía del pensamiento, en cuanto a leyes y elementos conceptuales de una teoría.

Por todo esto, dice Reichenbach, que en el contexto de la física clásica:

“Debemos considerar nuestras afirmaciones sobre los objetos no observados no como afirmaciones comprobables, sino como convenciones, de las que echamos mano por mor de la gran simplificación del lenguajes. Lo que sabemos es que *si* se introduce esta convención puede trabajarse con ella sin contradicción alguna; que *si* suponemos que los objetos no observados son idénticos a los observados, llegamos a un sistema de leyes físicas válidas tanto para los objetos observados como para los no observados”⁵⁴.

La circularidad de este postulado es manifiesta pero no gratuita, pues se justifica sobre la base de su necesidad. Es necesario suponer que las partes atómicas comparten con su compuesto mesofísico las mismas propiedades, para poder considerar a ambos objetos materiales en el mismo sentido físico, de modo que no se produzca ninguna fisura en la descripción física: los conceptos han de tener el mismo significado para que, una vez aplicados al microcosmos, no pierdan su conexión con la realidad (contenido intuitivo).

Además, gracias a este postulado, también el ideal de objetividad y la noción de realidad independiente conservan su aplicabilidad a la Naturaleza, aunque ésta se entienda desde el atomismo mecanicista del materialismo clásico.

Por tanto, en la física clásica no hay un cambio cualitativo entre ambos niveles, sólo hay una diferencia de grado en función de su tamaño que no pone en peligro la homogeneidad del universo.

Así como tampoco hay límites absolutos de la Naturaleza a nuestro conocimiento de ella, porque si tales límites existieran no se podría llevar a cabo el ideal de descripción completa, ya que se desconocerían, absolutamente⁵⁵, ciertos datos que bien podrían contradecir nuestros cálculos, introduciendo factores y circunstancias fuera de nuestro control e indeterminables por principio, no sólo *de facto* sino también *de iure*, con lo cual el conocimiento que tendríamos del mundo no sería exacto. Esta imprecisión no permitiría la practicabilidad del ideal determinista, sin el cual no puede predecirse el comportamiento causal de la Naturaleza.

⁵⁴ REICHENBACH, H., La filosofía científica, p. 188.

⁵⁵ Es decir, ni siquiera la teoría permitiría la posibilidad de ese conocimiento, aunque sólo se trate de una posibilidad teórica sin acceso a él en la práctica.

En definitiva, al ideal descriptivo del marco clásico no le pueden faltar datos, pues perdería consistencia lógica como base conceptual de sus teorías; por tanto, el microcosmos no se puede regir por otras leyes distintas de las que ya se conocen en la escala mesocósmica.

e) Conclusión. Los ideales descriptivos de la física clásica

Durante la Modernidad apareció en la ciencia un determinado ideal descriptivo realista, sobre todo en la física, el cual defendía la correspondencia entre los términos de la teoría y los elementos de la realidad: dicha correspondencia ofrece la posibilidad de comprender y aprehender el mundo que nos rodea. Dicho lo cual, el “contenido intuitivo” de las teorías físicas puede entenderse como aquello que las pone en correspondencia con el mundo externo que ellas describen. Esta correspondencia se da entre los términos de la teoría (conceptos) y los elementos de la realidad (objetos), con lo cual se alcanza el objetivo del ideal realista descriptivo (comprensión y explicación del mundo), además de la descripción matemática (predicción y cálculo).

En su momentos mostraré que Bohr y Einstein afirman que una teoría física tiene “contenido intuitivo” cuando posee elementos conceptuales y teóricos *objetivos*, en la medida en que son capaces de establecer una conexión, del tipo anterior, entre la descripción, que aporta la teoría, y el mundo exterior, que aquélla está describiendo y explicando.

Es en este sentido en el que defenderé, en este trabajo, que Bohr fue un pensador realista: sólo en tanto que opuesto al instrumentalismo científico. Ahora bien, para ello, primero he de advertir que la correspondencia que supone el marco clásico es de un tipo determinado, tal que asegura el contenido intuitivo de una teoría, postulando un isomorfismo estructural entre lenguaje y realidad y otro isomorfismo entre los niveles físicos: desde el representacionismo pictórico de las nociones clásicas se elaboró un lenguaje intuitivo propio de las descripciones visuales en el espacio y en el tiempo (ideal cartesiano de describir los objetos físicos con figuras y movimiento); además, estas nociones han de tener siempre el mismo significado para que, una vez aplicadas al microcosmos, no pierdan su conexión con la realidad (su contenido intuitivo).

Este lenguaje posibilita la descripción de los objetos materiales del mundo físico tal y como son ellos mismos, independientemente del sujeto que elabora la teoría, porque implica que las propiedades mecánicas de los

conceptos de la teoría son las mismas que las que poseen *realmente* los objetos. Con lo cual, objetividad y realismo están unidos dentro del programa racionalista de la ciencia clásica.

De esta manera, una vez supuesta la base de la continuidad esencial en la Naturaleza, se estableció la incuestionabilidad de las características fundamentales del ideal descriptivo de la física tradicional. Estas características se presentan bajo la forma de tres ideales clásicos, que pudieron defenderse gracias a los cuatro postulados generales, que he venido exponiendo en este capítulo.

El marco de la causalidad se basa en el postulado de la “*continuidad* de la Naturaleza en sus acciones”, porque de él se derivará la posibilidad de plantear la noción clásica de observación sobre la que se levanta el ideal de descripción objetiva⁵⁶. También supone que los pares de magnitudes canónicamente conjugadas, que dan cuenta de las propiedades geométricas y dinámicas de los sistemas, son *independientes*. De modo que, es posible establecer sus valores con la mayor precisión sin que interfiera la una en la determinación de la otra, pues la interferencia puede ser aislada, controlada y eliminada.

Gracias a lo cual, puede darse una descripción espacio-temporal de su estado al tiempo que su explicación causal, cuya conjugación independiente es la condición que establece el *determinismo físico*, en el que desemboca el ideal clásico de la descripción completa, convirtiéndose en una exigencia de toda teoría científica la absoluta predictibilidad causal.

Además, también consigue un marco realista perfectamente descrito por las leyes y los conceptos físicos, entendidos como *representaciones pictóricas* del objeto físico, que avalan el ideal de descripción y explicación física y aportan el fundamento para el materialismo atomista con el que se explica, con las mismas leyes matemáticas, universales, necesarias y eternas, la realidad física en todos los niveles, incluso aquello que no podemos observar ni conocer⁵⁷.

Sin embargo, las leyes de la física cuántica no permiten nada de aquello: no revelan el futuro de los sistemas ni sus propiedades al modo clásico; rompen la perfecta similitud entre el macrocosmo y el microcosmo, sobre la que descansa la explicación del primero; no permiten una noción de observación ajena al acto de medida, así como tampoco una representación pictórica de los acontecimientos atómicos; ni puede

⁵⁶ Cuyas exigencias pueden ser realizadas porque las ha hecho posibles el principio de continuidad supuesto en todas ellas.

⁵⁷ Por ejemplo, cuando se aplicó el “sistema planetario” al interior del átomo.

defender, en los términos que establece el marco clásico, un ideal de descripción objetiva ni exhaustiva de los sistemas físicos; ni hablar de éstos como sistemas cerrados, en el sentido de “realidad física independiente”.

Las leyes cuánticas sólo expresan, en palabras de Einstein, “las variaciones en el tiempo de las probabilidades y que se refieren a conjuntos o agrupaciones de un gran número de individuos”⁵⁸; pero realizan esto de tal forma que hacen tambalear los firmes cimientos de la física clásica, porque el fracaso de los tres ideales clásicos conlleva la aparición de los tres problemas fundamentales, determinismo, objetividad y contenido intuitivo, que la física contemporánea plantea al realismo científico y a los cuales Bohr intentará dar solución.

La causa de tal desmoronamiento, de la concepción clásica del mundo, fue la irrupción de la idea de discontinuidad en el horizonte de la física, a través del postulado cuántico. Antes de analizar el sentido y las implicaciones epistemológicas de éste, expondré primero un breve recorrido histórico sobre su origen y desarrollo, como soporte de la posterior argumentación acerca de su significado físico y de la problemática realista que abrió, dadas sus intrínsecas consecuencias conceptuales.

⁵⁸ EINSTEIN A./INFELD. L., La evolución de la física, p. 239.

CAPÍTULO II:

«APUNTES HISTÓRICOS SOBRE EL ORIGEN DE LA FÍSICA CUÁNTICA»

En el capítulo anterior se vio que la hipótesis atómica daba una explicación de cómo era la materia, el compuesto material, sobre todo, acerca de sus características de extensionabilidad, divisibilidad y compresibilidad. Pero, cuando la física cuántica se adentró en la naturaleza y características del átomo, y no ya como modelo explicativo pues se convirtió en objeto directo de estudio, descubrió cómo son esos elementos constitutivos de la materia, cuyas características son distintas a aquéllas que la física clásica establece para el compuesto material, que ellos conforman a nivel mesofísico: los objetos de la escala humana. De modo que no se puede volver a reconstruir el compuesto material, a partir de las leyes físicas de sus constituyentes, ya que no hay continuidad isomórfica entre la naturaleza y características del átomo y las propiedades del compuesto que esos átomos constituyen: se rompe el puente entre los dos niveles, conocidos como el mundo microfísico y el mundo macrofísico, el cual comprende al mesofísico.

El problema es que si no sabemos cómo conectar la física clásica con la física cuántica, no sabemos cómo conectar aquellos dos niveles de realidad. El modelo, con el cual se explicó la materia durante dos mil años, ha convertido a ésta en inexplicable: es una teoría que atenta contra la capacidad que tenían las teorías clásicas de aprehender el mundo y, junto a ella, contra el realismo de la ciencia.

La responsable de tal ruptura entre el mesocosmos y el microcosmos fue la introducción de la discontinuidad cuántica en el seno de la física, la cual trajo consigo el problema del doble modelo explicativo, corpuscular-ondulatorio, tanto para la materia como para la radiación¹. La

¹ Es interesante fijarse en que el constituyente elemental de la electricidad, la energía eléctrica (radiación), es el electrón; pero éste es, a su vez, una partícula material: uno de los elementos del átomo, de la materia. La relación entre materia y radiación está siempre presente y todas estas relaciones fueron saliendo a la luz cuando se comenzó a investigar cómo la radiación interactúa con la materia, precisamente, el problema de la radiación del cuerpo negro. Cuando aún no se estudiaban estas relaciones y el átomo era sólo un modelo

física clásica dispuso de dos modelos para explicar dos tipos de realidades: el modelo atómico para la materia y el modelo ondulatorio para la radiación; pero la física cuántica, al adentrarse en la estructura de ambas y convertir al átomo en el objeto mismo de la explicación, conjugará los dos modelos para explicar la misma realidad, por ejemplo, un electrón, un fotón o un neutrón.

Antes de entrar en los problemas epistemológicos, a los que se enfrentó la física cuántica y en la solución que aportó Bohr, este capítulo reconstruye la situación científica entre los años 1900 y 1926. Fue durante este periodo cuando apareció la noción de cuanto y se produjo el posterior desarrollo matemático de la nueva física. No obstante, el origen de todo esto ha de buscarse en el siglo XIX, ya que el estudio de la radiación y de los espectros electromagnéticos fue el que le abrió la puerta a la teoría cuántica.

2.1) Tres Momentos en la Evolución del Cuanto

El estudio de la radiación se desarrolló a partir de la teoría electromagnética de Maxwell y la teoría clásica del calor, ambas fundamentadas bajo los presupuestos teóricos de la mecánica de Newton, y, no obstante, ellas llevaban el germen de su propia destrucción. Éste se manifestó en tres predicciones suyas acerca del comportamiento de la radiación, no corroboradas por los resultados experimentales:

1) La ley de Rayleigh predecía el aumento indefinido de energía en la radiación que emite un *cuero negro*.

2) La imagen de las ondas establecía que la velocidad de los electrones expulsados del metal, en el efecto fotoeléctrico, dependería de la intensidad de la luz empleada en él.

3) Las leyes de la física clásica condenan al átomo a su autodestrucción: según las ecuaciones de Maxwell y Lorentz, los electrones en el interior del átomo deberían precipitarse sobre el núcleo porque deben radiar en sus órbitas, al moverse alrededor de él.

El factor común que comparten las tres predicciones es que se basan en el carácter continuo de la imagen ondulatoria de la energía, cuyas dificultades se disiparán al considerar los resultados experimentales desde la nueva imagen corpuscular que traerá la noción de *cuanto*.

explicativo, se disponía de un modelo corpuscular para la materia y del modelo ondulatorio del electromagnetismo para estudiar la propagación de la luz en el vacío.

Los *cuantos* fueron introducidos en la física en el año 1900, cuando Max Planck propuso un “pequeño” postulado para resolver un problema muy localizado dentro de la termodinámica: el problema del *cuerpo negro ideal*, o *radiador integral*. Pero, en realidad, este problema plantea una cuestión mucho más relevante para la física. Si bien ya se conocía cómo se transmitía la radiación por el espacio² y que su origen estaba en el interior de los átomos, lo que se desconocía era cómo se emite y se absorbe esta radiación por parte de la materia. Solucionar el problema de la *radiación del cuerpo negro* era resolver este último enigma acerca de la naturaleza de la radiación. Se pensó que ésta sería una solución sencilla, pero sus consecuencias fueron tan catastróficas para la física clásica como anunciaba el nombre del problema que con él se resolvió: “la catástrofe ultravioleta”.

a) La hipótesis de Planck: el cuanto de energía

Con el desarrollo de la espectroscopia, durante el siglo XIX, apareció un hecho inexplicable: los espectros electromagnéticos, característicos de cada elemento químico, en estado gaseoso eran discontinuos, pues aparecían en ellos unas franjas oscuras, a las que no se les podía encontrar una explicación.

El fenómeno es el siguiente. Cuando un haz de luz atraviesa una hendidura estrecha y después pasa por un prisma de cristal, éste se descompone en todas las longitudes de onda que forman su espectro continuo. De forma que, el espectro de la luz visible comprende las longitudes de onda con valores entre 4.000 y 7.000 Ångstroms (Å) que van del color rojo al violeta, mientras que el espectro total de la radiación va desde las ondas de radio ($\lambda=1$ cm) hasta los rayos γ ($\lambda=0,1$ Å), pasando por el infrarrojo ($\lambda=10$ μm), el ultravioleta ($\lambda=1000$ Å) y los rayos X ($\lambda=10$ Å), teniendo en cuenta que 10.000 Å = $1\mu\text{m}$ (micrómetro) y 10.000 μm = 1cm (centímetro). Pero, si interponemos un gas en el recorrido del rayo luminoso, el espectro se vuelve discontinuo, mostrando unas rayas oscuras que lo atraviesan con una determinada regularidad característica del gas que estemos utilizando.

El estudio de la espectroscopia se inició en 1814 cuando J. Fraunhofer descubrió dicho fenómeno: la estructura continua del espectro del Sol, en el que se descompone la luz, era interrumpida por líneas

² En forma de ondas electromagnéticas, según la interpretación de Maxwell.

oscuras. Pero tuvieron que pasar cuarenta y cinco años hasta que los químicos R.W. Bunsen (1811-1899) y G. R. Kirchhoff (1824-1887) desarrollaran la técnica del análisis espectral de los elementos químicos, usando un espectroscopio. De estas investigaciones surgirá la *ley de la radiación* de Kirchhoff:

“(…) los vapores absorben precisamente la luz cuya longitud de onda es igual a la de algunas rayas espectrales que ellos mismos emiten. (...) De este modo se consiguió explicar las misteriosas líneas oscuras del espectro del Sol; son líneas de absorción debidas a los elementos en estado gaseoso que recubren la superficie solar.

Meditando sobre su descubrimiento, llegó Kirchhoff en pocos meses a la conclusión de que el poder emisor dividido por el poder absorbente de cualquier cuerpo es una función universal de la longitud de onda y la temperatura”³.

Este descubrimiento permitía conocer la composición química de cualquier objeto con sólo analizar su característico espectro una vez identificadas las líneas espectrales de cada elemento químico⁴. Pero los espectroscopistas tuvieron muchos problemas para encontrar el espectro de líneas que le corresponde a cada elemento porque el número de líneas puede alcanzar varios millares; tardaron años en descubrir las relaciones entre las frecuencias de estas rayas espectrales, es decir, la ley que regía su regularidad en cada cuerpo químico⁵. Cuando estas leyes fueron descubiertas, se encontró que todas las fórmulas utilizadas obedecían a una regla general, llamada *principio de combinación*: “las frecuencias de todas las líneas espectrales de un elemento son diferencias de un conjunto de números fijos que se llamaron términos espectrales”⁶. Sin embargo, el significado físico de estos números se ignoraba por completo y oscurecía el problema de la relación entre la materia y la radiación.

La física clásica no parecía capaz de explicar el origen de las rayas ni la presencia de los términos espectrales ni cuál es la distribución de las cargas eléctricas en el átomo que le hacen radiar. La respuesta a este

³ SÁNCHEZ DEL RÍO, C., Los principios de la física en su evolución histórica, p. 222.

⁴ Gracias a lo cual se ha podido conocer tanto la composición química de las estrellas como la de los diferentes átomos.

⁵ Las leyes más importantes son la ley de Balmer-Ritz: $v=R(1/m^2-1/n^2)$, donde m y n son números enteros y R una constante universal, y la fórmula de Rydberg, $v=v_2-R/(n+\mu)^2$.

⁶ SÁNCHEZ DEL RÍO, C., Los principios de la física en su evolución histórica, p. 224.

enigma permaneció oculto hasta el año 1913; el camino que llevó a esta solución se inició justo cuando se estrenaba el nuevo siglo XX.

El estudio de cómo se realizan los intercambios energéticos en su proceso de emisión y de recepción se basó en la noción de *cuerpo negro*, propuesta por Kirchhoff, al darse cuenta de que su ley de la radiación permite pensar en un cuerpo hipotético con un coeficiente de absorción de energía igual a la unidad, es decir, que absorba cualquier radiación que sobre él incida; además, este cuerpo, una vez calentado, es un radiador integral que emite luz en todas las longitudes de onda, cuya intensidad depende de la temperatura del radiador y de cada longitud de onda. Aunque se trata de una noción ideal, se encontró un ejemplo bastante aproximado en la Naturaleza: los hornos, en los que se puede alcanzar un equilibrio térmico y mantener la temperatura uniforme y constante⁷.

Aquellas características permiten medir en él la densidad de energía (E/V) que le corresponde a cada longitud de onda (λ) en la distribución espectral de la radiación emitida. Según la fórmula tradicional, esta intensidad relativa, será mayor cuando el volumen disminuya, más exactamente, cuando se acorte la longitud de onda; sin embargo, el resultado obtenido directamente de la medición de la densidad de energía relativa (u) en el cuerpo negro no coincidió con esa predicción teórica: ésta se repartía siguiendo una curva en campana, llamada “curva de Lummer y Pringsheim”, o “campana de Gauss”. Era siempre la misma curva, sólo cambiaba su tamaño en función de la temperatura (T) del radiador. El significado de esta forma en campana es que la repartición de energía va aumentando hasta llegar a un valor máximo en una determinada longitud de onda, pero después disminuye a partir de un valor crítico según se acerca a las longitudes de onda más cortas, precisamente en la zona del espectro electromagnético que va del azul al ultravioleta, la zona de las altas frecuencias y bajas longitudes de onda⁸. Éste era el fenómeno que el físico Pal Ehrenfest llamó “catástrofe ultravioleta”.

Se inició, así, la búsqueda de una ley que predijera la densidad de energía para cada longitud de onda y en función de la temperatura del cuerpo negro⁹; pero, se encontraron dos y muy distintas, que, además, no

⁷ Cf. Ibid, p. 223; o también, PAPP, D., La doble faz del mundo físico, p. 54.

⁸ Cf. PAPP, D., La doble faz del mundo físico, p. 56.

⁹ Es decir, la cuestión estaba en encontrar la función universal de Kirchhoff: $E/A = f(\lambda, T)$, donde E es el poder emisor, A es el poder absorbente, λ es la longitud de onda, y T es la temperatura.

eran capaces de explicar por sí solas la totalidad del resultado experimental ni tampoco lo que ocurre en las longitudes medias de onda de la curva, obtenida experimentalmente, con las que ninguna de las dos fórmulas coincidían¹⁰.

Para explicar este fenómeno Max Planck se basó, primeramente, en la *Ley de Wien*, una de aquellas dos fórmulas que rigen la distribución de energía en el espectro del cuerpo negro:

$$u = \alpha \nu^3 \exp(-\beta \nu T)$$

Sin embargo, esta fórmula no se ajusta a lo que ocurre en la zona de las bajas frecuencias, de modo que también tuvo que aceptar y explicar la *Ley de Rayleigh-Jeans*:

$$u = 8\pi \nu^2 kT/c^3$$

Pero la constatación empírica de la curva de Lummer y Pringsheim, también está en contradicción con esta ley, la cual prevé un aumento ininterrumpido de la densidad al acercarnos a la zona de las grandes frecuencias del espectro. Además, esta teoría asigna valores demasiado grandes a tales longitudes de onda, pues predice un aumento infinito de la densidad total de energía, en cada temperatura¹¹.

En medio de esta situación, en la que se necesitaban dos leyes diferentes para un mismo fenómeno, la una válida para la zona de las altas frecuencias y la otra sólo para las bajas, Planck consiguió dar con una *ecuación empírica*, que para las bajas frecuencias se convierte en la ley de Rayleigh y para las altas en la de Wien¹²:

$$u = A \nu^3 / [\exp(-\beta \nu T) - 1]$$

No obstante, la fórmula no era suficiente, pues se trataba de una extrapolación empírica de las dos leyes anteriores sin ningún apoyo teórico. De modo que Planck dedicó los tres meses siguientes a buscar una base física para su fórmula, desde la que se dedujera de forma natural. Probó con diferentes hipótesis físicas, pero ninguna encajó bien con su ecuación, hasta que, por último, decidió intentarlo también con la interpretación estadística de la entropía, a la que había dejado de lado debido a sus prejuicios científicos como defensor de la termodinámica

¹⁰ Cf. PAPP, D., *La doble faz del mundo físico*, p. 55.

¹¹ Ibid, p. 57.

¹² Cf. MURDOCH, *Niels Bohr's Philosophy of Physics*, pp. 2-3. Planck presentó esta fórmula ante la Sociedad de Física de Berlín en el mes de octubre.

clásica y acérrimo oponente de la concepción estadística, que Ludwig Boltzmann (1844-1906) ofreció de la entropía, según la ecuación $S = k \ln W$ ¹³.

Sin embargo, a pesar de su firme oposición a esta teoría, al final tuvo que aceptarla, pues fue la única solución que funcionó y sin este fundamento físico¹⁴ su fórmula se quedaba en una mera relación empírica, afortunada y que encajaba con los hechos observados, pero sin la consistencia teórica que le otorgaría aquél¹⁵:

“Para proporcionar una demostración convincente de su fórmula, Planck abandonó la termodinámica y recurrió a la fórmula de Boltzmann $S = k \ln W$ de la mecánica estadística (en este estudio introdujo la constante k). Para calcular la probabilidad W admitió que la energía de un oscilador es múltiplo de una pequeña cantidad (*Energieelemente*) ϵ , con lo cual la energía media de un oscilador es $\bar{E} = \epsilon / [\exp(\epsilon/kT) - 1]$. Esto es compatible con su fórmula semiempírica si se admite que $\epsilon = h\nu$, siendo h una constante independiente de la frecuencia. De este modo llegó el 14 de diciembre de 1900 a la célebre ley de distribución espectral de la radiación del cuerpo negro:

$$u(\nu, T) = (8\pi\nu^2/c^3) h\nu / [\exp(h\nu/kT) - 1]^{16}$$

Fórmula en la que aparece su *hipótesis de los cuantos*: los intercambios energéticos entre materia y radiación se realizan de forma discontinua por medio de ciertas cantidades bien definidas y discretas, a las que llamó “cantidad mínima de acción”¹⁷, y que vienen dadas por la

¹³ Donde S es la entropía, k una constante térmica introducida por el propio Boltzmann, y W la probabilidad de alcanzar el estado más probable.

¹⁴ Recuérdese que la termodinámica clásica trata la energía de forma continua, mientras que la mecánica estadística ofrece un tratamiento corpuscular de aquélla, al subdividir el continuo de energía en porciones finitas. Por consiguiente, no es extraño que en la fórmula de Planck se llegue a hacer explícita una discontinuidad que yacía en la explicación del segundo principio de la termodinámica, la entropía, que da Boltzmann en términos atomísticos y de probabilidades. Cf. GRIBBIN, J., En busca del gato de Schrödinger, p. 33. Ver también: KUHN, T.S., La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica, 1894-1912, pp. 58-163, donde se desarrolla con mayor rigurosidad el origen de esta teoría, y su herencia estadística, concretamente me estoy refiriendo a la deuda que Planck contrajo con Boltzmann cuando recurrió a su definición combinatoria de la entropía.

¹⁵ Cf. GRIBBIN, J., En busca del gato de Schrödinger, pp. 31-32.

¹⁶ SÁNCHEZ DEL RÍO, C., Los principios de la física en su evolución histórica, p. 227.

¹⁷ El término *cuanto de acción* fue acuñado por Einstein y su valor numérico fue calculado por Planck en $6,55 \times 10^{-27}$ erg-segundos.

constante h . Así, la distribución total de la energía debía ser dividida entre un número finito de estas cantidades y no infinito como proponía la teoría clásica.

Esta hipótesis cuántica romperá con el postulado clásico de la continuidad de las acciones en la Naturaleza, que se había mantenido vigente durante tres siglos. A partir de ella Planck pudo afirmar que el error en los cálculos de Rayleigh, que conducen a esa predicción final del aumento indefinido de energía, se debe a que en ellos se supone la naturaleza continua de la radiación¹⁸, la cual concede la posibilidad de ser infinitamente dividida y subdividida por el acortamiento continuo de las longitudes de onda. Pues, es a este hecho, al que le corresponde ese absurdo acrecentamiento infinito de la energía, permitiendo su emisión y absorción en cualquier cantidad¹⁹, admitiendo, así, la conclusión contraria: el intercambio de energía radiante no puede ser infinitamente dividido, por tanto, hay un límite inferior por debajo del cual el cuerpo calentado no es capaz de emitir o recibir energía.

Con esto se explica que la curva de Lummer y Pringsheim adopte una forma de campana, ya que el cuanto de energía es pequeño en la zona de las grandes longitudes de onda, esto es, que le basta una pequeña cantidad de energía para radiar o para absorber esta radiación. Motivo por el cual todos sus "resonadores"²⁰ tendrán la cantidad de energía que necesitan para radiar, pero, como la longitud de onda es larga, su densidad de energía relativa será pequeña, pues tendrá que distribuirse entre muchos. A medida que la longitud de onda se hace más corta, la intensidad relativa va aumentando, porque el volumen entre el que se ha de repartir se ha hecho más pequeño²¹, aunque este aumento de la intensidad

¹⁸ La razón de esta predicción es que la física clásica considera que la emisión-recepción de luz por parte de la materia son procesos continuos y que la energía de una onda sólo depende de su amplitud, de manera que, ésta es una magnitud continua, lo cual permite que la cantidad de energía, que se emite o se absorbe, pueda aumentar o decrecer infinitamente. Cf. ANDRADE E SILVA, J./LOCHAK, G., Los cuantos, p. 66.

¹⁹ Cf. PAPP, D., La doble faz del mundo físico, pp. 57-58: "Así, la radiación -y en general todo intercambio energético- posee una estructura discontinua, cinematográfica, produciéndose a saltos, en escalones iguales. Estos escalones o granos de energía son los cuantos".

²⁰ Planck pensó que la mejor forma cómo debemos representarnos un cuerpo radiante es suponiendo que contiene un gran número de resonadores, recurriendo a la analogía de Lorentz sobre los osciladores armónicos. Cf. *Ibid*, p. 59.

²¹ Siguiendo con la analogía de los resonadores, diríamos que hay menos pero siguen radiando todos.

no es indefinido, pues el cuanto de energía también crece al mismo ritmo y proporcionalmente a la frecuencia.

Así pues, una vez alcanzado un valor máximo para una cierta longitud de onda, el proceso se invierte descendiendo rápidamente la intensidad relativa para las radiaciones de longitud de onda corta que se sitúan más allá del valor crítico.

La razón de esto es la siguiente: como el cuanto de energía de las ondas cortas va aumentando con la frecuencia requerirá de la distribución energética una cantidad mínima de energía cada vez mayor para hacer vibrar sus resonadores.

Por este motivo, llegará un momento en el que no habrá energía suficiente para hacerlos vibrar a todos, y la mayoría de ellos quedará en reposo, sin radiar: obedeciendo así a la hipótesis de Planck, al establecer que un resonador sólo puede perder o adquirir energía en un número entero de cuantos, que está en función de la frecuencia y de h , o múltiplos enteros de h , siendo siempre h el factor de proporcionalidad que regula esa cantidad de energía ϵ . A pesar de que el número de resonadores sigue haciéndose cada vez más pequeño para las ondas cortas, la densidad de la energía disminuirá, en lugar de aumentar, porque no todos ellos podrán emitir esa energía.

Esta hipótesis de los cuantos resuelve el enigma del cuerpo negro, pero no se pudo aceptar como una explicación auténtica de lo que le sucede a la radiación durante sus intercambios energéticos porque contradice la naturaleza continua de ésta, sobre la que descansa la explicación ondulatoria de la radiación y, en definitiva, todo el edificio de la física clásica. Por esto Planck la consideró como una mera hipótesis matemática que sólo se podía aplicar al problema concreto de la radiación del cuerpo negro; esta situación se mantuvo así mientras no apareció ningún otro fenómeno con la extraña relación que establece h .

Sin embargo, en 1905 Einstein la utilizó para explicar otro tipo de problema, esta vez relacionado con la luz: el llamado *efecto fotoeléctrico*. Por tanto, el carácter restringido que atribuyó Planck a su hipótesis fue perdiendo sentido y, lo que comenzó como hipótesis, fue adquiriendo el rango de realidad, rebelándose contra su origen instrumentalista. Si la noción de cuanto tenía o no realidad física era algo que sólo la experiencia decidiría²².

²² “El cuanto, si era más que un sueño físicomatemático, debía revelar su existencia en otras interacciones entre radiación y materia, y su poder aclaratorio debía afirmarse precisamente allí donde la antigua imagen de la onda se encontrara en flagrante contradicción con la experiencia”. PAPP, D., La doble faz del mundo físico, p. 71.

b) La teoría fotónica de Einstein: el cuanto de luz

En 1887 Heinrich Hertz observó que la luz ultravioleta tiene la propiedad de cargar eléctricamente la superficie de un metal cuando incide en él y que es el color del rayo incidente el que determina esa expulsión de los electrones encerrados en el interior de la materia. Este fenómeno se conoce con el nombre de *efecto fotoeléctrico*.

El interés que este fenómeno despertó entre los físicos del siglo XIX se debía a la relación que en él se observaba entre la energía del rayo, causante de la expulsión de las cargas eléctricas negativas, y la energía cinética de los electrones expulsados. Pues no es la intensidad del rayo luminoso, es decir, la cantidad de luz suministrada, la que rige la expulsión, sino su frecuencia; la única función que realiza la intensidad de la luz es la de aumentar proporcionalmente a ella el número de electrones extraídos del metal. Además, para cada metal existe una longitud de onda límite por encima de la cual no se extrae ningún electrón, de modo que los rayos de luz que la sobrepasan no producen este tipo de efecto²³.

Se trata de un fenómeno incomprensible para la física clásica, ya que en la teoría ondulatoria de la luz la frecuencia no tiene ninguna relación con la energía, ni reconoce límite alguno a la repartición de esta última por toda la superficie del metal, sobre la que se diluye cada vez más a medida que aumenta la distancia entre el metal y la fuente luminosa. Por consiguiente, la imagen ondulatoria concluía que la energía del rayo estaría uniformemente repartida y muy diluida, siendo entonces proporcional a la intensidad, con lo cual todos los electrones del metal recibirían un poco de esa energía.

Ahora bien, esto no es lo que ocurre de hecho, pues se observó que la energía cinética de los electrones no varía con la distancia; por tanto, la energía no se diluye, más bien queda concentrada en un determinado número de partículas entre los que se reparte enteramente su energía. El punto esencial en el que diverge la imagen corpuscular de la ondulatoria no es en la cantidad de energía (razón por la cual se podrá seguir manteniendo el principio de conservación), sino en el modo como se reparte esa energía²⁴.

²³ Cf. ANDRADE E SILVA, J./LOCHAK, G., Los cuantos, pp. 68-70.

²⁴ Cf. PAPP, D., La doble faz del mundo físico, pp. 71-72.

Sin embargo, en 1905 sí se conocía una fórmula en la que se relacionaba la energía con la frecuencia y que establecía una “frecuencia-umbral” más allá de la cual no se producía ningún intercambio energético: era la *ley de los cuantos* de Planck, cuya “única” desventaja era el estar fuera del alcance explicativo del modelo clásico de onda electromagnética y su reducido ámbito de aplicación, al que quedó restringido, además, como mero artilugio matemático.

Einstein ignoró estos serios inconvenientes y adaptó la fórmula de Planck al efecto fotoeléctrico; esto le obligó a admitir que la energía no sólo se emite y se absorbe por cuantos, sino que también es de naturaleza discontinua, pues toda onda de luz monocromática de frecuencia ν transporta *cuantos de luz*, portadores de la misma cantidad discreta de energía dada por la fórmula $\varepsilon=h\cdot\nu$. Con lo cual la teoría de Einstein no sólo rompe con la continuidad de los intercambios energéticos, sino también con el modelo de onda con el que se explicaba todo tipo de radiación electromagnética, incluida la luz²⁵.

Así, convirtió la dudosa y controvertida ley en un principio general de la radiación electromagnética²⁶ que requería un nuevo modelo desde el que entender su naturaleza: el modelo corpuscular, según el cual la luz está formada por cuantos discontinuos de energía, a los que G.N. Lewis llamó “fotones”. Einstein les atribuyó realidad física, y no sólo en los procesos de emisión y absorción de luz por parte de la materia, sino también durante su propagación por el espacio.

De este modo, la explicación del fenómeno fotoeléctrico será la siguiente: un corpúsculo luminoso choca contra un corpúsculo material, electrón, al cual le comunica su cuanto de energía. Una parte de esta energía será empleada por el electrón para vencer la fuerza con que el núcleo le mantiene unido a él, pero el resto será utilizada por el electrón

²⁵ “Einstein subrayó que la hipótesis de los quanta de Planck exigía una revisión teórica importante; no podían ser considerados como un simple artificio matemático sin dimensión física real, sino que tenían implicaciones físicas muy importantes. De ese modo, justificaba además su propio punto de vista de 1905, es decir, que no basta con suponer, como había hecho Planck, que la *emisión* y la *absorción* de radiación se efectúan por múltiplos de $h\nu$, sino que es absolutamente imperativo admitir que la *energía de radiación* luminosa no puede existir si no es por múltiplos de $h\nu$. Lo cual entraba precisamente en contradicción con la teoría del campo electromagnético, en donde las energías varían siempre de forma continua”. Cf. DELIGEORGES, S., *El mundo cuántico*, p. 56.

²⁶ Cf. ANDRADE E SILVA, J./LOCHAK, G., *Los cuantos*, p. 71.

para incrementar su energía cinética: la velocidad con la que se aleja del núcleo²⁷.

Incluso, la energía del fotón será la que determine el hecho de expulsar o no un electrón, pues puede ocurrir que esa energía no tenga la fuerza necesaria para liberar al electrón de la atracción nuclear, con lo cual, y en este caso, nada se consigue aumentando la intensidad del rayo, porque, por grande que sea el número de fotones que empleemos, se tratará de fotones con un cuanto de energía muy pequeño e insuficiente para vencer la fuerza electrodébil del núcleo atómico. Lo que se debe hacer, para obtener el efecto, es aumentar la frecuencia de la radiación, tal y como aparece en los resultados experimentales, y como se sigue de la fórmula de Planck, que establece un cuanto de energía mayor para frecuencias más altas.

Así, se obtiene que en estos casos el electrón dispondrá de más energía y podrá desprenderse de su núcleo, y, una vez conseguido esto, su velocidad aumentará, en función del incremento de la frecuencia del rayo de luz expulsador, pues dispondrá de un excedente de energía susceptible de convertirse en energía de movimiento.

Por este camino llegó Einstein a la fórmula para la energía cinética de los electrones expulsados, donde W es la cantidad constante de energía que el electrón gastará para desprenderse del núcleo:

$$E_c = h \cdot \nu - W$$

Cuando la E_c de esta fórmula sea igual a cero, se obtendrá la frecuencia-umbral (ν_0) por debajo de la cual no se extraerá ningún electrón, mientras que toda aquella frecuencia que sea superior producirá el incremento de la energía cinética de los electrones expulsados, siendo su energía cinética máxima:

$$E_{\max} = h \cdot \nu - h\nu_0$$

Fórmula de la que se sigue que la E_{\max} aumentará con la frecuencia, como establecía la experiencia, y con la que se explican todos los fenómenos que contengan efectos fotoeléctricos²⁸.

Aunque, para dar una explicación completa, Einstein debía conocer otro dato más, y éste es el del impulso del fotón, pues necesitamos saber cuál es la cantidad de movimiento capaz de imprimir un cuanto luminoso al chocar contra un electrón. Pero en la fórmula del impulso

²⁷ Cf. ORTOLI, S./PHARABOD, P., El cántico de la cuántica, p. 30.

²⁸ Cf. ANDRADE E SILVA, J./LOCHAK, G., Los cuantos, pp. 71-72.

falta un dato porque se sabe que la velocidad de un fotón es c , pero se desconoce cuál es su masa: $p=m \cdot v$, donde m es la masa y v la velocidad.

Éste problema Einstein lo resolvió así: despejó la masa de su famosa fórmula relativista $E=m \cdot c^2$ y sustituyó la energía E por la energía del cuanto $\varepsilon=h \cdot \nu$, para dar con una fórmula para la masa del fotón: $m=h \cdot \nu / c^2$. Y si la llevamos a la fórmula del impulso, obtenemos que $p=(h \cdot \nu / c^2) \cdot c$; como c es igual a la longitud de onda por la frecuencia, entonces $p=h \cdot \nu / \lambda$. Con lo cual se llega a la siguiente igualdad, donde ha quedado ligada la magnitud corpuscular del impulso p a la longitud de onda²⁹:

$$p=h/\lambda$$

El único detalle que quedaba por explicar en la interpretación de Einstein era el hecho de que, superada la frecuencia-umbral, fuera la intensidad del rayo incidente el que determinara el número de electrones expulsados por él.

Para resolver esta cuestión, Einstein supuso una proporcionalidad entre la intensidad de la onda y el número de fotones que lleva; de tal modo que, cuanto mayor sea el número de fotones, mayor probabilidad habrá de que choquen contra algún electrón, con lo que aumentará el número de electrones extraídos. Si la energía total de la onda es la suma de las energías de todos sus fotones, tenemos que todos los fotones de la onda monocromática tendrán la misma energía, y la energía total será proporcional a su número. Gracias a esta hipótesis Einstein consiguió un cierto acuerdo con la óptica clásica, en relación con la afirmación de que la energía está definida por la intensidad de la onda³⁰, a pesar de que la intensidad, a partir de ahora, se entenderá como un mero indicador de probabilidades.

En 1916 el físico Robert A. Millikan (1868-1953) probó la validez de la ecuación de Einstein: midió la energía de los electrones expulsados y demostró que permanece proporcional a la frecuencia de los fotones del rayo incidente, como establece la fórmula³¹. Además, confirmó el valor numérico de h calculado por Planck.

De este modo, la imagen corpuscular de la luz parecía imponerse al modelo ondulatorio y, sin embargo, seguía creando muchos problemas:

²⁹ Cf. PAPP, D., La doble faz del mundo físico, p. 84.

³⁰ Cf. ANDRADE E SILVA, J./LOCHAK, G., Los cuantos, pp. 72-75.

³¹ Cf. PAPP, D., La doble faz del mundo físico, pp. 75-76.

si la estructura de la luz es discontinua, los fenómenos de interferencias y de difracción no parecen tener explicación; además, su origen por la oscilación de los electrones en el átomo también se debe explicar. Todos estos problemas suscitaban una cierta desconfianza entre los físicos hacia la teoría de Einstein, la cual fue sometida a prueba una y otra vez e, incluso, buscaron el testimonio irrefutable de demostrar no sólo la validez de la fórmula de Einstein, sino también la existencia real de los fotones a través de un experimento capaz de captar la presencia individual de un fotón.

Este experimento se consiguió realizar en 1926 por Compton, donde se manifestó el peculiar comportamiento de las partículas atómicas, conocido como *el efecto Compton*:

“(…) si dirigimos un rayo luminoso sobre un electrón, inevitablemente provocaremos un efecto Compton: la colisión de un fotón del rayo con el electrón lo desplazará de su posición, imprimiéndole una velocidad distinta a la que nos proponíamos observar. La medida nos indicará entonces lo que pasa después del choque comptoniano y ningún método imaginable nos podrá revelar lo que hubiera ocurrido si no hubiéramos provocado el choque perturbador”³².

Pero, el peso de la prueba experimental fue desdeñado por los físicos mientras no se resolviera el problema fundamental, que dicha hipótesis plantea, acerca del origen de la ración por la oscilación de los electrones dentro del átomo. Si se explicaba desde este modelo corpuscular, la amplitud de oscilación dejaría de ser una magnitud continua, pues había que reconocer que sólo permanecería constante mientras no se emitiera ningún cuanto, pero que disminuiría bruscamente en tanto tuviera lugar una emisión. Esta explicación fue inaceptable hasta el año 1913, y se consideró como un argumento en contra de esta teoría, aunque un primer paso hacia su comprensión fue la teoría de los fotones de Einstein³³.

c) La teoría atómica de 1913: el postulado cuántico de Bohr

A finales del siglo XIX se empezó a admitir no sólo que la materia está constituida por átomos, sino que éstos no son indivisibles, pues se

³² Ibid, p. 87.

³³ Cf. ANDRADE E SILVA, J./LOCHAK, G., Los cuantos, p. 67.

conocían procedimientos, como el del efecto fotoeléctrico, para extraer electrones del interior de los átomos y, además, eran unos elementos que se necesitaban para poder indagar en la relación entre la materia y la luz, establecida por los fenómenos de radiación térmica y por los de la espectroscopia.

Así pues, Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) se preguntó cuál era la relación entre la materia y la radiación para que el átomo fuera capaz de emitir y absorber luz. La respuesta la obtuvo al identificar las cargas eléctricas del campo electromagnético de Maxwell, cuya oscilación era la causa de la radiación, con la *cantidad mínima de electricidad* que propuso Helmholtz. A partir de 1892 desarrolló su *teoría de los electrones*, basándose en el postulado fundamental de Maxwell acerca de que todos los campos eléctricos y magnéticos provienen de campos eléctricos móviles.

En consecuencia con esto, escribió las llamadas “*ecuaciones de Maxwell y Lorentz*”, en las que las constantes materiales (ϵ , μ , σ) que aparecen en las ecuaciones de Maxwell han sido sustituidas por las constantes en el vacío (ϵ_0, μ_0, c), donde $\mathbf{j} = \rho \cdot \mathbf{v}$, siendo ρ la densidad de carga eléctrica y \mathbf{v} la velocidad con que se mueve la carga³⁴, quedando así:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho / \epsilon_0; \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0; \quad \nabla \times \mathbf{B} - (\delta \mathbf{E} / \delta t) / c^2 = \mu_0 \mathbf{j}; \quad \nabla \times \mathbf{E} + \delta \mathbf{B} / \delta t = 0$$

De estas nuevas ecuaciones se deduce que todo cuerpo móvil con carga eléctrica y con movimiento acelerado debe radiar luz constantemente, de ahí que la explicación del origen de la radiación se planteara desde la oscilación de los electrones.

Como los electrones tienen carga eléctrica negativa y los átomos materiales son neutros, era razonable pensar que los átomos están formados por dos tipos de partículas subatómicas: electrones y otras con carga positiva que compensase la negativa de aquéllos. Además, si los átomos tenían partes constituyentes, había que descubrir la forma en que éstas se relacionan entre sí dentro del átomo.

De modo que en 1904 J. J. Thomson (1856-1940) lanza la primera propuesta sobre la estructura atómica: el átomo es una esfera de carga eléctrica positiva en cuyo interior se encuentran los electrones en reposo y que sólo oscilan cuando son excitados, emitiendo radiación. Las ventajas de este modelo fueron que apoyó la explicación de Lorentz de la dispersión y absorción de luz imaginando los electrones como osciladores armónicos y que con él se pudo estimar el número de electrones, que

³⁴ Cf. SÁNCHEZ DEL RÍO, C., Los principios de la física en su evolución histórica, p. 198.

contienen los átomos, su masa y su carga eléctrica³⁵. Los inconvenientes fueron que seguía sin explicar las líneas y términos espectrales; a lo que se sumó la experiencia de Ernest Rutherford (1871-1937): en 1909 bombardeó los átomos con los rayos α de las sustancias radiactivas y descubrió que los resultados³⁶ quedaban inexplicados desde el modelo de Thomson.

Así, en 1911 el propio Rutherford propuso otro modelo: núcleo muy pequeño y muy masivo de carga positiva, rodeado de electrones a considerable distancia, que se mueven alrededor del núcleo, cuya carga eléctrica caracteriza al elemento y cuya masa es aproximadamente dos veces el número atómico. También demostró que la radiactividad es el resultado de la transmutación de un átomo en otro átomo de diferente tipo. Sin embargo, este modelo tuvo un gran inconveniente y es que puso en entredicho la propia estabilidad del compuesto atómico de la materia. Este problema surgió de dos consideraciones: una de ellas provenía de las leyes de Newton acerca del movimiento orbital de un móvil, y la otra de las leyes de Maxwell-Lorentz relacionadas con el origen de la radiación.

Por un lado, la fórmula de Newton para la Gravitación Universal $F=m \cdot m'/r^2$ estipula que un cuerpo de masa m dentro del campo gravitacional de otro más masivo, m' , ha de vencer la fuerza centrípeta con la que éste le atrae hacia sí, en función de la distancia que separa ambos cuerpos, con el fin de no precipitarse sobre él. Este equilibrio se consigue, según la ley fundamental de Newton $F=m \cdot a$, incrementando la velocidad. Puesto que la masa es constante, esta aceleración le hará adquirir la fuerza necesaria para oponerse a la centrífuga con la misma intensidad, pero en dirección opuesta, alejándose del otro cuerpo.

La resultante del equilibrio de estas dos fuerzas producirá un movimiento acelerado, que se manifiesta en una trayectoria circular, debido al cambio de la componente direccional del movimiento correspondiente al elemento vectorial de la velocidad. Como la energía cinética es la energía del movimiento de un móvil, tenemos que el incremento de velocidad, que supone la aceleración, indica un aumento de la energía cinética. De forma que, si este incremento se realiza de manera proporcional a la fuerza atractiva, queda garantizado el equilibrio entre las

³⁵ Cf. Ibid, p. 242.

³⁶ En estos experimentos algunos rayos α atravesaban el átomo sin que éste ofreciera resistencia y otros rebotaban como si hubiesen “chocado” contra algo mucho más masivo que las partículas α .

dos fuerzas y, por tanto, los cuerpos se mantendrán equidistantes el uno del otro.

Si ahora consideramos cuerpos cargados eléctricamente, tenemos que la fuerza con que se atraen es proporcional a su carga e , según la ley de Coulomb, y disminuye con el incremento de la distancia: $F=e \cdot e'/r^2$. Ésta es una fórmula análoga a la de Newton, por tanto, tendrá las mismas consecuencias atractivas que la dinámica newtoniana, aunque ahora no es la fuerza de gravedad la que está actuando, sino la fuerza electrostática.

Pero, por otro lado, si estas cargas no están inmóviles, son las leyes de Maxwell-Lorentz las que rigen su comportamiento y éstas estipulan que todo móvil cargado eléctricamente cuyo movimiento no sea rectilíneo y uniforme emitirá luz continuamente³⁷, pues al cambiar su dirección, para trazar una trayectoria cerrada, perderá energía cinética en forma de radiación. Es decir, los electrones deben radiar luz al moverse dentro de sus órbitas. Lo cual significa que, al perder energía cinética su velocidad disminuirá y no podrán poner resistencia a la atracción electrostática que el núcleo, con carga positiva, ejerce sobre ellos, pues es esa energía cinética la que ha de compensar la fuerza nuclear. Por tanto, los electrones se precipitarían sobre el núcleo; hecho éste que en realidad no sucede³⁸.

De este modo, la física clásica entra en contradicción consigo misma, al establecer que la condición para contrarrestar la fuerza atractiva del núcleo es que el electrón, de menor masa y de carga opuesta, adquiera mucha energía cinética incrementando la velocidad con la que gira alrededor del núcleo; sin embargo, las leyes de Maxwell y Lorentz niegan la posibilidad de que esto suceda porque el intento de los electrones de adquirir energía cinética durante su movimiento orbital queda frustrado por las mismas ecuaciones que explican el origen material de la radiación: al girar sobre las órbitas no ganan energía cinética, sino que la pierden en forma de luz radiante, ya que ésta es, precisamente, la causa de que los electrones emitan luz constantemente.

Por consiguiente, la física tenía que rendirse a uno de estos dos enigmas: si eligen salvar el problema de la estabilidad del átomo, habrán de renunciar al modelo de Rutherford o bien a las leyes de Maxwell, y en consecuencia a la explicación de Lorentz sobre el origen de la radiación; pero, si se deciden por mantener esta explicación, la estabilidad del átomo

³⁷ Cf. ORTOLI, S./PHARABOD, P., El cántico de la cuántica, p. 32.

³⁸ Cf. PAPP, D., La doble faz del mundo físico, p. 95.

de Rutherford queda como un hecho incomprensible que contradice las leyes dinámicas y las del electromagnetismo, incluida la ley de la fuerza de atracción electrostática de Coulomb.

Bohr salvará estas dificultades negando las leyes de Maxwell-Lorentz, pero sin contradecir las leyes de Newton y Coulomb: supuso simplemente que el electrón no radia al moverse dentro de su órbita y, por tanto, no perderá energía cinética mientras siga en su órbita, sino al cambiar de una órbita a otra, solucionando así, de un solo golpe, el doble problema de la estabilidad del átomo de Rutherford y del origen de la radiación. No obstante, el precio por salvar esta contradicción, en la que había caído la física tradicional, fue, por un lado, el de introducir una discontinuidad, ajena a la *racionalidad clásica*, en el seno de los constituyentes atómicos de la materia, y, por otro, proponer una teoría atómica donde se mezclan elementos de la física clásica y los conceptos cuánticos de las teorías de Planck y de Einstein³⁹.

El camino que recorrió Bohr hasta llegar a esta situación comenzó cuando propuso su teoría sobre el átomo de hidrógeno en el año 1913. Esta teoría se basa en las dos hipótesis o postulados siguientes:

- “1. Un sistema atómico posee una multiplicidad de estados posibles, los "estados estacionarios", que en general corresponden a una serie discreta de valores de energía y que tienen una estabilidad particular, puesta de manifiesto porque toda variación de energía de un átomo debe venir acompañada de una "transición" de éste de un estado estacionario a otro.
2. La posibilidad de que un átomo emita o absorba radiación está condicionada por las posibles variaciones de energía del átomo, de modo tal que la frecuencia de la radiación queda determinada por la diferencia de energía entre los estados inicial y final según la relación forma $h \cdot \nu = E_1 - E_2$ ”⁴⁰.

El primer postulado “es una condición de cuantificación de la energía del átomo porque las energías correspondientes a las diversas

³⁹ “La teoría de Bohr aparece así como un fascinante monstruo híbrido. Describe los átomos como minúsculos sistemas solares, donde los electrones giran en torno a los núcleos según las prescripciones de la Mecánica de Newton. Pero, de todos los movimientos clásicamente posibles, no conserva más que un número muy pequeño, aquellos que respetan la regla de los cuantos”. ANDRADE E SILVA, J./LOCHAK, G., Los cuantos, p. 93.

⁴⁰ BOHR, N., “La teoría atómica y la mecánica” (1925), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, p. 78.

órbitas estacionarias no forman un continuo”⁴¹, sino niveles discretos, discontinuos. De esta forma la energía se presenta cuantizada en cantidades mínimas, y se le llamará *nivel energético* a cada energía posible que estipula la **condición cuántica de Bohr**.

Ésta se deriva de la fórmula de Einstein para el impulso (p) de un fotón, donde se ha sustituido λ por 2π , que es la circunferencia de la órbita más pequeña que sigue el electrón⁴². Consecuentemente, entre todas las órbitas clásicamente posibles sólo serán permitidas las órbitas donde el impulso del electrón respete la condición cuántica de:

$$p=n(h/2\pi)$$

Esta fórmula establece que los electrones sólo pueden emitir o absorber energía en cantidades discretas, determinadas por h , o múltiplos enteros de h . Tales cantidades son las mismas que las que establecen el número de órbitas permitidas al electrón, entre las cuales está la llamada *fundamental*. Dicha órbita es la más inferior porque es aquella que regula h , más allá de la cual no se puede producir ningún efecto porque los cambios energéticos de órbita no pueden tomar valores fraccionarios de h .

El segundo postulado “indica que la luz se emite o absorbe en forma de cuantos de luz o fotones de energía $h\nu$ y que la energía total del átomo más la radiación se conserva”⁴³. De forma que la causa de la radiación ya no será el movimiento acelerado de las cargas siguiendo la trayectoria curvilínea de su órbita, sino el misterioso *salto cuántico* del electrón que “no sigue” ninguna trayectoria, pues se considera que en el *salto* el electrón está al margen de toda coordenada espacio-temporal.

Una vez supuesta la condición cuántica, era necesario afirmar el segundo postulado para conservar la coherencia interna en el argumento de Bohr⁴⁴. Pues si el primero estipuló que las órbitas son niveles discretos de energía, las variaciones en la energía han de producirse por un cambio de órbita, que es donde residen las diferencias energéticas.

El factor común que subyace en ambas hipótesis es lo que Bohr denominará **postulado cuántico**: la energía tiene un carácter discreto, a causa de introducir la constante h en los niveles del átomo, como

⁴¹ SÁNCHEZ DEL RÍO, C., Los principios de la física en su evolución histórica, p. 244.

⁴² Cf. PAPP, D., La doble faz del mundo físico, p. 104.

⁴³ SÁNCHEZ DEL RÍO, C., Los principios de la física en su evolución histórica, p. 245.

⁴⁴ Cf. ANDRADE E SILVA, J./LOCHAK, G., Los cuantos, p. 93.

reguladora de sus estados energéticos⁴⁵. Bohr tuvo que admitir, por un lado, que los electrones en el interior del átomo obedecen a las leyes de Newton mientras giran alrededor de sus órbitas, los *estados estacionarios*, pero sin radiar y, por otro, a las leyes de Planck y de Einstein cuando cambian de órbita, emitiendo o absorbiendo energía en forma de radiación.

Este modelo fue posteriormente refinado por Sommerfeld⁴⁶ para que explicara la *estructura fina* del espectro. Pero, ya de momento aseguró la estabilidad del átomo en el modelo de Rutherford, al tiempo que consiguió explicar la serie Balmer para las frecuencias de las líneas espectrales del hidrógeno y también el principio de combinación en función de la idea de que las frecuencias del espectro vendrán también dadas por la ecuación $\nu = (E_i/h - E_f/h)$ y serán las diferencias de dos números característicos del átomo, con lo cual se desveló una parte del misterio de los términos espectrales, volviéndose calculables a partir de la condición cuántica⁴⁷.

También explicó por qué la energía luminosa, la cual se propaga en forma de ondas, es emitida en cantidades mínimas indivisibles, ya que, si la causa de la radiación es la oscilación de los electrones en el átomo, ésta ya no se podrá pensar como amortiguándose progresivamente, sino que la oscilación variará bruscamente en las cantidades enteras establecidas por la condición cuántica. Con esto queda aclarado por qué se produce el fenómeno de la *radiación del cuerpo negro*.

Por otro lado, se añadieron tres números cuánticos más, en total son cuatro, para completar este modelo, donde dichos números regulan el comportamiento del electrón en su órbita: el primero fue el que introdujo Bohr, el número *n*, también conocido como el número cuántico *fundamental*; después, Sommerfeld introdujo el *azimutal* para definir las órbitas elípticas; el *magnetón*, para describir el campo magnético; y, por último, el *spin* que define el momento magnético rotatorio del electrón.

El inconveniente de esta teoría atómica es que sólo puede hablar de las frecuencias de las rayas espectrales, y nada dice sobre la intensidad

⁴⁵ Cf. RIOJA, A., "La filosofía de la complementariedad y la descripción objetiva de la naturaleza", p. 262.

⁴⁶ Para lo cual introdujo órbitas elípticas en lugar de las circulares de Bohr, y las variaciones relativistas que padecen los electrones al moverse en torno al núcleo con velocidades próximas a la de la luz, unos 1.000 km/sg. Cf. ANDRADE E SILVA, J./LOCHAK, G., *Los cuantos*, pp. 97-98.

⁴⁷ La presencia de estos términos sólo se aclarará del todo con la explicación que dio de Broglie.

y polarización de la luz emitida por los átomos cuando los electrones saltan de una órbita a otra; sin embargo, el electromagnetismo clásico sí podía calcular las intensidades de las rayas a partir de sus frecuencias.

Con el fin de completar su teoría cuántica sobre el átomo, tuvo que recurrir a la teoría clásica de Maxwell, que antes había rechazado, para obtener los cálculos de las intensidades.

Siguiendo este camino y para justificar el uso ilícito de la teoría de Maxwell, Bohr desarrolló el *principio de correspondencia*⁴⁸ al observar que la teoría del átomo de hidrógeno conduce a un resultado **análogo** al de la física clásica si los valores del *número cuántico principal*, n , el que determina las energías posibles del hidrógeno, son muy elevados.

d) El significado conceptual del cuanto de acción

No puedo cerrar este epígrafe, sobre la aparición del cuanto de acción, sin aclarar del significado conceptual de h . En cuanto a su origen dentro de la física clásica, la “acción” es una magnitud física (mvx), donde se relaciona la cantidad de movimiento (mv) con la coordenada x , y cuyo término fue acuñado por Hamilton y Maupertuis. Maupertuis lo introdujo en la física y Hamilton lo desarrolló hasta establecer el “principio de mínima acción”

Con dicho principio Hamilton consiguió dar con *un principio de mínimo* sobre el cual fundamentar la mecánica, que, a su vez, se inspiró en el principio de Fermat de la refracción de la luz. Aquél consiste en lo siguiente: las ecuaciones mecánicas del movimiento obedecen a un *principio de mínima acción*, tal que la naturaleza actúa de modo que la integral de la acción mvx es mínima. En estas ecuaciones del movimiento, la acción es la magnitud donde se conjugan las propiedades dinámicas y geométricas, ya que se trata de ecuaciones simétricas que permiten calcular, a la misma vez, el momento y la posición (o la energía y el tiempo); de ahí el nombre de magnitudes “canónicamente conjugadas” de Hamilton.

En cuanto a la magnitud de “momento”, o “cantidad de movimiento”, se define como el producto de la masa de un cuerpo por su velocidad (mv) y la del “impulso” como la fuerza por el tiempo (Ft). Sin embargo, ambas magnitudes dinámicas son equivalentes en función de la fórmula $Ft=mv$, que se deduce de la segunda ley newtoniana del

⁴⁸ Cf. ANDRADE E SILVA, J./LOCHAK, G., *Los cuantos*, pp. 98-99. Más adelante volveré sobre este principio para detenerme en él.

movimiento por establecer la proporcionalidad entre la variación de la velocidad y la fuerza imprimida al móvil.

De estas características físicas se extrae que el significado del concepto de acción implica que es una magnitud donde las propiedades dinámicas de cantidad de movimiento y energía se conjugan con las geométricas de la posición espacial y temporal. Ahora bien, en la física clásica, se pueden establecer con toda precisión y al mismo tiempo porque el espacio y el tiempo no tienen efectos sobre el movimiento de los cuerpos y, aunque los tengan, esta interacción puede ser anulada por una reducción indefinida de su valor, ya que se están manejando magnitudes de naturaleza continua.

No obstante, la diferencia entre el *cuanto de acción* y la noción clásica consiste en ser aquélla una magnitud discontinua que no permite nada de lo anterior: las propiedades dinámicas y geométricas están conjugadas en un mismo valor⁴⁹ que imposibilita su desvinculación física. La causante de esta diferencia entre la magnitud clásica de acción y la magnitud cuántica es el haber hecho discontinua esta cantidad: como ya se vio, el origen de la discontinuidad cuántica se sitúa en el problema termodinámico de la radiación del cuerpo negro.

Se recordará que en la ecuación empírica de Planck, donde se fusionaban las fórmulas de Rayleigh-Jeans y de Wien, en ella no aparece h . Después de darla a conocer en octubre, Planck se propuso dotarla de una base teórica, desde la cual deducirla, con el objetivo de ampliar su aplicabilidad, ya que esto le permitiría establecer relaciones con otros fenómenos y se podría explicar *físicamente*, desde una teoría, el fenómeno de la radiación del cuerpo negro.

Planck lo intentó con todas las teorías del momento, dejando para el final la termodinámica estadística de Boltzmann, porque era un fuerte detractor de la interpretación estadística de la entropía (el segundo principio termodinámico). Pero ninguna de aquéllas le sirvió y tuvo que probar con ésta: “*El mismo día que formulé por primera vez esta (nueva) ley (de distribución), comencé a dedicarme a la tarea de dotarla de significado físico real, tema que de por sí me llevó a considerar la relación entre entropía y probabilidad y por consiguiente a la línea de pensamiento*

⁴⁹ La constante h vincula la energía, magnitud dinámica, con la frecuencia, magnitud considerada geométrica por ser la inversa del período, el cual indica siempre un tiempo; de ahí el nombre de *cuanto de acción*.

de Boltzmann”⁵⁰. El éxito coronó esta empresa y consiguió deducir su ecuación de la teoría de aquél; fue, entonces, cuando apareció h .

El propio Planck confesó que éste fue “el trabajo más arduo de mi vida” y el 14 de diciembre presentó ante la Sociedad de Física de Berlín su nueva ecuación, donde había introducido la relación $h\nu$ para dotar de significado físico a su ley de distribución espectral de la radiación del cuerpo negro. Pero, no consideró que aquella relación también tuviera significado físico; todo lo contrario, la presentó como una hipótesis *ad hoc*.

El significado que Planck dio a su ley, la cual predice la densidad de energía para cada longitud de onda y en función de la temperatura del cuerpo negro, es el siguiente: el hecho de que exista una cantidad límite es aquello que impide el llevar a cabo el procedimiento clásico de reducir indefinidamente el valor de la interacción dinámica, que se introduce en el fenómeno observado para calcular su posición espacio-temporal, y viceversa, con lo cual estas magnitudes no podrán ser consideradas independientes ni se podrán establecer sus valores por separado.

Pero, si vamos más allá del significado heurístico, que le otorgó su descubridor, encontramos que este hecho impide pensar en la *trayectoria* como la *representación gráfica del movimiento*, tal y como se hacía en física clásica. La razón es que no es posible calcular toda la serie de posiciones asignadas a un móvil, ya que el cuanto de acción, la mera existencia de h , impide seguir esta traslación en el espacio en función de su velocidad (cantidad de movimiento o impulso), ya que ambos valores interfieren entre sí y no podemos calcularlos por separado. La original explicación que de Broglie ofrece de esta situación es la siguiente: todo móvil, objeto en movimiento, implica un cambio constante en la posición⁵¹, con lo cual no es posible atribuir una coordenada fija en el marco espacio-temporal si se está moviendo; sólo puede deducirse una serie de sus posiciones sucesivas, en función del conocimiento preciso de la velocidad de dicho movimiento. Citaré al propio de Broglie:

“El cuadro del espacio y del tiempo es esencialmente estático: un cuerpo, una entidad física que tiene una localización exacta en el espacio y en el tiempo está, en realidad también privada de toda propiedad evolutiva; al contrario, un cuerpo que evoluciona, que está dotado de propiedades dinámicas, no puede verdaderamente estar ligado a ningún

⁵⁰ Citado por Thomas Kuhn en: KUHN, T.S.: La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica, 1894-1912. Madrid, Alianza Editorial, 1980.

⁵¹ Cambio definido por su tendencia dinámica.

punto del espacio y del tiempo. Éstas son las observaciones filosóficas que se remontan hasta Zenón de Elea y sus discípulos”⁵².

Dicho de otro modo, la presencia de h en la nueva física impide dar una descripción cinemática⁵³ de un sistema físico, sin tener en cuenta su estado evolutivo-dinámico, y viceversa. Estos son los dos aspectos de la descripción clásica completa, pero que, ahora, están indisolublemente ligados en el cuanto de acción, tal que es esta unión la que impide asignarles sus valores exactos, ya que, para ello, se ha de poder concebir su desarrollo por separado y considerarlos datos independientes. Sin embargo, de Broglie propone que, a pesar de esta imprecisión en los valores de ambas propiedades, la descripción cuántica puede ajustarse más que la clásica a lo que debe ser una descripción *dinámica*, la cual está “condenada” a desarrollarse en el marco *estático* y geométrico del espacio. Por ello, la situación contraria, defendida en física clásica, de Broglie la interpreta como una *idealización* de las condiciones estipuladas por la propia noción de movimiento y posición.

Por otro lado, no ha de olvidarse la otra unión que fija el significado de h : los aspectos ondulatorio y corpuscular están vinculados desde las primeras ecuaciones. La primera manifestación de dicha unión se dio en la fórmula de Planck, a través de la cual el *cuanto de energía*, ε , estipula un tipo de mínimo concreto, en función del carácter discontinuo de h , para cada *frecuencia*, la cual es una magnitud de carácter ondulatorio y, por tanto, continuo. Aunque, en la hipótesis de Planck, tal vínculo sólo afecta a los procesos de intercambios de energía entre materia y radiación.

Sin embargo, en la fórmula de Einstein aparece la misma unión, donde ya no son los procesos de intercambio energético, aquellos que se explican, sino la propia naturaleza de la radiación, la cual posee este doble carácter cuando se propaga por el vacío, sin intervenir con la materia. En dicha fórmula para obtener el impulso de un fotón, que se utilizó para calcular el efecto Compton, es donde h aparece ligada, una vez más, a otra magnitud ondulatoria, la *longitud de onda*.

⁵² DE BROGLIE, L., *Física y Microfísica*, p. 136.

⁵³ Aquella que sólo ofrece una descripción geométrica de la traslación espacio-temporal de un móvil sin atender a sus causas o a su situación dinámica. La crítica que de Broglie hace al concepto de movimiento, a través del conflicto entre los aspectos dinámicos y cinemáticos, la tomó de la postura de Bergson en contra de la homogeneidad del espacio y del tiempo. Cf. DELIGEORGES, S., *El mundo cuántico*, p. 70.

Finalmente, también se encuentra, tal y como podrá leerse a continuación, en la tesis de de Broglie cuando versiona esta fórmula de Einstein para aplicarla a las partículas materiales, las cuales llevarán asociadas una longitud de onda. Desde esta teoría, se afirmará que no sólo hay *partículas de energía*, sino que también se ha de hablar de las *ondas de materia*. Éste es, en palabras de Papp, el vínculo definitivo entre las imágenes de onda y corpúsculo, entre lo continuo y lo discontinuo⁵⁴.

De todo esto, puede concluirse que el cuanto de acción es la responsable última de la dualidad porque está presente en todas aquellas fórmulas que introdujeron tanto el modelo ondulatorio de la materia como el modelo corpuscular para la radiación (llamados modelos no-estándar). Pero, además, no ha de perderse de vista que su naturaleza y significado físico implica, en las fórmulas de Einstein y de de Broglie, otra vinculación entre las magnitudes corpusculares, como es el impulso o cantidad de movimiento, y las magnitudes ondulatorias, frecuencia, longitud de onda.

No obstante, antes de adentrarse más en el problema de la dualidad, se ha de retroceder un paso y recordar los problemas con los que se encontraron los físicos, durante la fase de elaboración de la física cuántica, porque fue la solución de éstos, precisamente, lo que llevó a la física a la situación de tener que mantener los dos modelos para explicar el comportamiento y la naturaleza de un mismo objeto físico. A continuación expongo los problemas resueltos, que originaron este nuevo problema de la dualidad:

1) **La discontinuidad de los espectros electromagnéticos.** El “principio de combinación” recogía las leyes que relacionaban los espectros de líneas con cada elemento correspondiente: *las frecuencias de todas las líneas espectrales de un elemento son diferencias de un conjunto de números fijos (términos espectrales)*. El significado de estos términos espectrales fue una incógnita hasta 1913 (teoría atómica de Bohr) y 1924 (ondas de materia de de Broglie).

2) **La radiación del cuerpo negro** (1900). La ley de Rayleigh predecía el aumento indefinido de energía en esta radiación; situación experimental que no ocurría. *Solución*: la ley de Planck.

3) **El efecto fotoeléctrico** (1905). La imagen ondulatoria establecía que la velocidad de los electrones expulsados del metal en este efecto dependería de la intensidad de la luz empleada; en realidad, esto no ocurre, pues depende de la frecuencia. *Solución*: la teoría fotónica de Einstein.

⁵⁴ Cf. PAPP, D., La doble faz del mundo físico, p. 124.

4) *La estabilidad del átomo* (1913). Según las ecuaciones de Maxwell y Lorentz, los electrones en el interior del átomo se precipitarían sobre el núcleo porque deben radiar en sus órbitas. *Solución*: la teoría atómica de Bohr (“saltos cuánticos” y “órbitas electrónicas cuantizadas” que obedecen a la presencia de números enteros regidos por h o múltiplos suyos).

5) *El problema de la presencia de números enteros en el átomo* (1924). El por qué de la condición cuántica de Bohr y de los términos espectrales encontraron una explicación en la teoría de de Broglie sobre las ondas materiales: para que una onda no se autodestruya y sea estable, ha de cerrarse y para que pueda cerrarse, necesita números enteros; la materia también tiene un carácter ondulatorio y las órbitas estables son aquéllas que permiten los dos aspectos de la naturaleza: el corpuscular y el ondulatorio.

Todos estos problemas fueron resueltos por la teoría cuántica, pero a costa de introducir la incoherencia en la física, dado que al resolverlos surgió el problema de la dualidad e incluso los tres problemas epistemológicos relacionados con el realismo⁵⁵.

2.2) *La Dualidad Onda-Corpúsculo: Materia y Radiación*

Cuando Einstein introdujo la noción de cuanto luminoso, renació la vieja polémica del siglo XVIII entre el modelo corpuscular de Newton y el ondulatorio de Huygens, para explicar la naturaleza de la luz. La reaparición de este conflicto en nuestro siglo, lejos de resolverse a favor de uno u otro, se complicó aún más, al extenderse al ámbito de la materia, cuando de Broglie propuso el carácter ondulatorio de ésta, la cual había sido considerada corpuscular sin discusión alguna⁵⁶.

Onda y partícula son dos imágenes irreductibles entre sí y con características opuestas, según las cuales lo que es onda no puede ser a la vez

⁵⁵ La complementariedad hizo explícitos estos problemas y fue el intento de Bohr para resolver éstos y eliminar las contradicciones y ambigüedades que surgen de la utilización de los dos modelos: el objetivo primero de Bohr fue explicar por qué en física cuántica era compatible aquello que era clásicamente incompatible (modelo corpuscular y ondulatorio) y por qué se volvió incompatible aquello que era clásicamente compatible (magnitudes dinámicas y cinemáticas). Por último, si se acepta la solución epistemológica (que no física como las que propusieron el resto de los físicos) de Bohr, tenemos que esta solución creó otro problema: el del realismo.

⁵⁶ La causa desencadenante de esta dualidad vuelve a ser la introducción de la discontinuidad en la física a través del cuanto de acción de Planck.

corpúsculo y viceversa. Ya que, si partimos de que la energía es puntual, no puede estar difundida, como propone el modelo ondulatorio de la luz, pues, mientras que el corpúsculo tiene una posición bien definida en un solo punto, la onda extiende su posición a toda una región del espacio. Además, a cada imagen le corresponde las propiedades contrarias de los modelos de discontinuidad y de continuidad. Por último, si entendemos la luz como un flujo de partículas, se le puede dar una explicación mecanicista de su comportamiento, pero si es una onda, su comportamiento no puede ser reducido al modelo explicativo de corpúsculos chocando entre sí. Esto fue precisamente lo que pretendió Newton con su teoría de la emisión, según la cual la luz consiste en haces de partículas, cuyo tamaño depende del color, y que son emitidos por los objetos luminosos. Con esta teoría explicaba los fenómenos ópticos por medio de atracciones y repulsiones de los corpúsculos, que siguen las leyes de su mecánica, propagándose a través de un éter material.

El aspecto dramático que adquirió esta situación, en la que ambas imágenes no dejaban de contradecirse al tiempo que se mostraban irrenunciables para explicar todos los fenómenos relacionados con la materia y la radiación, llevó a Bohr a plantearse la solución de este problema como una de sus tareas epistemológicas más urgentes. De ahí, la importancia del origen y desarrollo del conflicto que surgió de tales explicaciones⁵⁷. Al final del capítulo daré algunas caracterizaciones acerca de la naturaleza y el carácter realista del cuanto de acción, ya que éste se convertirá en el protagonista del conflicto entre los modelos corpuscular y ondulatorio.

a) Las ondas luminosas y los fotones

⁵⁷ “Niels Bohr’s theory of complementarity was an attempt to solve the enormous problems of interpretation -especially the problem of wave-particle duality- that beset the quantum theory in the mid-twenties (...). Quantum mechanics, the new quantum theory, could be interpreted partially in terms of one or other of the two models but not comprehensively in terms of either. (...) Bohr’s theory can be fully understood only against the background of the interpretative problems which it was intended to solve; and the root of these problems goes back to the very origin of the quantum theory, viz. the quantum hypothesis to the effect that in certain physical processes energy is transferred discontinuously in discrete amounts. Wave-particle duality was a development of the continuity-discontinuity duality which the quantum hypothesis introduced into physics”. MURDOCH, D., Niels Bohr's Philosophy of Physics, p. 1.

Materia y energía eran las dos sustancias que se estudiaron en los siglos XVIII y XIX y cada una poseía su propio modelo explicativo. Sin embargo, la dualidad a la que se enfrentaron los físicos en esta época no se presentó como una auténtica dicotomía porque cuando se utilizaba una de las teorías⁵⁸ se renunciaba inmediatamente a la otra. Se trataba de una mera elección, por tanto, nunca se utilizaron ambos modelos al mismo tiempo como explicación de la misma entidad física. Sin embargo, el siglo XX demandó el uso de los dos modelos simultáneamente para explicar tanto la materia como la luz. La importancia de esta situación se manifiesta en el hecho de que tanto los problemas de la nueva teoría como las soluciones, que los dos formalismos teóricos aportaron, giraron en torno a ella.

A mediados del siglo XIX se estudiaron fenómenos que no tenían explicación desde el modelo corpuscular de Newton y sí desde el modelo de onda luminosa. Así, la teoría ondulatoria de Huygens salió vencedora de la polémica entre las dos teorías luminosas, más de un siglo después, al poder explicar todo lo que explicaba la teoría corpuscular⁵⁹, además de los nuevos fenómenos de interferencias, difracción y polarización de la luz, estudiados por T. Young, A. J. Fresnel y D. F. Arago, que son incomprensibles desde el modelo corpuscular y que no sólo son explicados por la teoría ondulatoria, sino que también fueron predichos. Es importante resaltar esta predicción porque en función de ella se decidirá si un fenómeno es de naturaleza ondulatoria o no.

Desde el modelo de Huygens se argumentó que la luz se propaga en línea recta siempre y cuando la longitud de onda sea más pequeña que los obstáculos y aberturas con los que se encuentra. De lo que se sigue la siguiente predicción: la luz se doblará, bordeando los objetos, en el caso de que éstos sean lo bastante pequeños en comparación con la longitud de onda del rayo luminoso. Éste era precisamente el fenómeno de difracción, que probó la desviación de la propagación rectilínea de la luz, tal y como predijo la teoría ondulatoria y en contra de la teoría corpuscular, la cual no admite que la luz pueda bordear un obstáculo en ningún caso⁶⁰.

Además, explicó el fenómeno de interferencias, según el cual luz más luz a veces da oscuridad, desde la idea de que las ondas de un haz y las

⁵⁸ Para explicar o bien la materia o bien la luz.

⁵⁹ Ambos modelos explicaban el desplazamiento de la luz en línea recta, su velocidad, el fenómeno de dispersión con su correspondiente explicación de los colores, y la refracción.

⁶⁰ Por tanto, afirma que las sombras proyectadas por los objetos son siempre nítidas.

del otro pueden encontrarse en oposición de fase, es decir, cuando el valle de la onda de uno coincide con la cresta de la onda del otro, anulándose entre sí. También pudo dar razón de la polarización de la luz al sustituir la noción de onda longitudinal por las vibraciones transversales, que son perpendiculares a la dirección de propagación⁶¹.

El experimento de la “doble rendija”, ideado por Young, demostró este comportamiento ondulatorio de la luz, el cual se estableció firmemente como un hecho irrefutable al tiempo que irreconciliable con el tratamiento discontinuo que ofrecía la teoría corpuscular: los fenómenos de interferencias y difracción se deben a que la luz se transmite por el espacio en forma de ondas⁶². Por consiguiente, estos fenómenos no admitirán otro modelo explicativo, hasta el punto de que todo fenómeno que muestre este tipo de comportamiento será indiscutiblemente considerado como un fenómeno de naturaleza ondulatoria.

Durante el siglo XX la situación cambió, debido a que la teoría corpuscular de Einstein también era indispensable, pues era la única capaz de explicar la radiación del cuerpo negro y todos los fenómenos que contenían el efecto fotoeléctrico y el efecto Compton.

“Tenemos ahora dos modelos para describir la naturaleza de la luz dependiendo del modo en el cual la observemos: si realizamos un experimento de interferencia, la luz se comporta como una onda, pero si examinamos el efecto fotoeléctrico la luz se comporta como un chorro de partículas. ¿Es posible reconciliar estos dos modelos?”⁶³.

En un principio esta reconciliación se buscó reduciendo uno de los dos modelos al otro. Bohr prefirió mantener el modelo ondulatorio, porque sin él la magnitud física de frecuencia no podía tener ningún sentido, y en ella se basaban tanto la noción de onda como la de corpúsculo luminoso, además de la evidencia empírica de los experimentos de interferencias y difracción. Mientras que Einstein defendió el modelo corpuscular y encontró un apoyo en la teoría de Bose.

Satyendra Bose demostró en 1924 la ley de Planck, partiendo únicamente de la hipótesis de los fotones como partículas relativistas, sin masa y sin *spin*, y que obedecen a una estadística especial desarrollada por

⁶¹ Cf. EINSTEIN, A./INFELD, L., La evolución de la física, pp. 95-104.

⁶² Éstas son las ondas hertzianas, sobre las que se construyó la teoría electromagnética de Maxwell y cuya existencia fue probada por Hertz al reproducirlas en el laboratorio.

⁶³ RAE, A., Física cuántica ¿Ilusión o realidad?, p. 21.

el propio Bose. A estas partículas se les llama *bosones* y se diferencian de los fermiones, partículas con el *spin* semientero, en que no tienen *spin* o lo tienen entero.

Los bosones obedecen a la estadística Bose-Einstein, y no a la estadística desarrollada en 1926 por Fermi y Dirac. Según esta última, las partículas respetan el principio de exclusión; pero en la de Bose-Einstein no lo hacen, por lo tanto, varias partículas podrán ocupar el mismo estado cuántico de energía perdiendo su discernibilidad. Esta característica es la responsable del fenómeno de la radiación negra. Otra diferencia más es que los bosones pueden ser fabricados en tantas cantidades como se quiera, sin embargo, el número total de fermiones en el universo es constante: el número de fermiones se conservan en las interacciones⁶⁴.

Con esta interpretación se eliminaron los elementos ondulatorios que aún conservaba la explicación de Einstein⁶⁵. Además, estaban los experimentos de Millikan, y sobre todo, el de Compton que demostraba la realidad de los fotones, al captar su presencia en un fenómeno de colisión típico de entes corpusculares, donde el fotón al chocar contra un electrón libre rebota y pierde una cierta cantidad de energía, que se manifiesta en un cambio de su color como consecuencia de la disminución de su frecuencia. La única condición que debía darse para que esta explicación funcionara era que se respetaran los principios de conservación de la energía y del impulso, porque sin ellos no se podía calcular la pérdida de energía ni la del impulso después de la colisión⁶⁶.

Así, tuvieron que convivir ambos modelos si se quería poder explicar la totalidad de los fenómenos luminosos, pues ambas teorías eran indispensables, al tiempo que carecían lógicamente de relación alguna. La búsqueda de tal relación guió el desarrollo de la mecánica cuántica.

b) Tesis de de Broglie: partículas y ondas materiales

Tener que admitir un doble paradigma para la energía fue un duro golpe a la coherencia lógica de la física; pero lo que no pudo sospecharse es

⁶⁴ Cf. GRIBBIN, J., En busca del gato de Schrödinger, p. 82.

⁶⁵ “(...) Bose consiguió finalmente eliminar los componentes clásicos de la teoría cuántica. La radiación se podía tratar a partir de entonces como un gas cuántico, y la estadística implicaba la contabilidad de partículas, no la de frecuencias de ondas”. GRIBBIN, J., En busca del gato de Schrödinger, p. 81.

⁶⁶ Cf. PAPP, D., La doble faz del mundo físico, p. 83.

que el doble aspecto corpuscular y ondulatorio se le habría de asignar también a la materia, la cual se había explicado durante siglos por el modelo corpuscular de manera indiscutible.

Fue en 1925 cuando Louis de Broglie propuso en su tesis doctoral que la dualidad onda-corpúsculo, descubierta por Einstein en relación con la luz, debía tratarse de una característica de la Naturaleza en general y, por tanto, que afectaría también a las partículas materiales: los electrones⁶⁷. De Broglie sí que partió de la aceptación directa de la existencia de la dualidad onda-partícula⁶⁸ y desarrolló las matemáticas que describen el comportamiento de las ondas materiales. En la tesis de de Broglie encontramos que la onda de materia no es una onda monocromática, es decir, de una única longitud de onda que se extiende ilimitadamente por el espacio, sino un grupo de ondas que interfieren entre sí provocando una cierta amplitud máxima, la altura de la onda, que se desplaza, según esta tesis, a la misma velocidad que el corpúsculo:

“En otras palabras, así como un sonido, por ejemplo, resulta de la superposición de un conjunto de ondas (la onda fundamental y las armónicas), la onda de de Broglie debe considerarse como un conjunto de longitudes de onda que abarcan $\lambda=h/p$ y que van de un mínimo λ_{\min} a un máximo λ_{\max} ”⁶⁹.

Con esta hipótesis se pudo comprender el porqué de la condición cuántica de Bohr: ¿por qué un electrón puede mantenerse solamente en una determinada órbita cuantizada, regulada por números enteros? ¿Cuál es el significado de estos números?

“La teoría de Bohr asocia a los granos de materia números enteros y es así como distingue a los movimientos "estables" de los que no lo son. ¿Podría ser que hubiese ahí una "onda de materia" todavía desconocida que acompañase al grano de materia tal y como una "onda luminosa" acompaña al fotón? Podría ser, en efecto, que esta onda no subsistiese en el átomo más que a condición de ser estacionaria; los movimientos

⁶⁷ Cf. ANDRADE E SILVA, J./LOCHAK, G., Los cuantos, p. 106.

⁶⁸ “Él sostenía que el fracaso de los experimentos en poner de manifiesto, de una vez por todas, si la luz es onda o es partícula, se debía a que ambos tipos de comportamiento van unidos, hasta el punto de que para medir la propiedad corpuscular que representa el momento hay que conocer la propiedad ondulatoria llamada frecuencia”. GRIBBIN, J., En busca del gato de Schrödinger, p. 73.

⁶⁹ ORTOLI, S./PHARABOD, P., El cántico de la cuántica, p. 34.

estables del electrón estarían gobernados entonces por números enteros asociados a la teoría de las ondas y serían precisamente estos números los que introducía la teoría de Bohr⁷⁰.

El hecho de que los números enteros aparezcan siempre en los fenómenos de vibración y de interferencia hizo sospechar a de Broglie acerca de la existencia de una onda de materia, y que esta onda estaría asociada a la órbita electrónica, pues supuso que la energía de una partícula estaría unida a la frecuencia de su onda por la ecuación de Planck $\epsilon=h\nu$, al relacionar esta fórmula con la ecuación de la Relatividad, $E=mc^2$, «admitió que a todo grano material de masa m está asociada una onda cuya frecuencia está definida por la igualdad: $h\nu=mc^2$ »⁷¹. De aquí partirá la idea de que una onda asociada al electrón en una órbita estable ha de ser estable también, por ello llamó *onda estacionaria* a la onda que le corresponde al electrón cuando está en uno de sus posibles estados estacionarios.

Ahora bien, para que la onda pueda quedar estacionaria ha de cerrarse, situación que se expresa por la igualdad $2\pi r=n\lambda$, donde 2π es el perímetro de la órbita circular, r su radio, λ la longitud de onda y n un número entero. Ésta es la diferencia fundamental entre las ondas de luz y las ondas materiales: estas últimas son menos rápidas y están “cautivas”, como las vibraciones de una cuerda con los extremos fijos⁷².

El siguiente paso fue calcular la longitud de esta onda estacionaria⁷³. Para ello recurrió a la relación de Einstein⁷⁴, donde se vincula el impulso a la longitud de onda, de modo que, si despejamos λ de ella: $\lambda=h/p$, y se la lleva a la fórmula anterior, que establece la estabilidad de la onda, tenemos que: $2\pi r=n(h/p)$

Con esta fórmula es posible determinar la longitud de la onda en función del impulso, de n y de h ; pero si se despeja el impulso, y al radio se le asigna la unidad, se obtiene precisamente la condición cuántica de Bohr: $p=n(h/2\pi)$, desde la que ya se estableció que las únicas ondas permitidas

⁷⁰ ANDRADE E SILVA, J./LOCHAK, G., Los cuantos, p. 108.

⁷¹ Ibid, p. 109.

⁷² Cf. PAPP, D., La doble faz del mundo físico, p. 132.

⁷³ Cf. Ibid, p. 124.

⁷⁴ Puede ser interesante resaltar el hecho de que fue la misma fórmula, la del impulso de Einstein: $p=h/\lambda$, la que guió el experimento de Compton, con el que se demostró la realidad de los fotones, y también la que utilizó de Broglie para calcular la onda de materia asociada al electrón. Fórmula deducida de la *ley de los cuantos* de Planck.

serán aquéllas en las que el impulso del electrón tenga la cantidad estipulada por la fórmula.

De esta forma, de Broglie reemplazó las *reglas formales* de cuantización de Bohr por las *propiedades de la onda de materia*, incluyendo la teoría de los cuantos en una teoría más general de las ondas, y estableció una relación entre óptica y mecánica⁷⁵.

La misma igualdad aparece ahora en los cálculos de de Broglie, pero esta vez no como un postulado, sino como una consecuencia lógica derivada del hecho de que el electrón posee una onda asociada a su estado estacionario. Con lo cual la explicación de la estabilidad del átomo queda definitivamente así:

“Una trayectoria es estable si permite a la onda asociada al electrón volverse sobre sí misma, encontrarse después de cada recorrido en la misma fase. Sobre todas las otras trayectorias la onda no podría subsistir, sus fases discordantes la destruirían. Las únicas trayectorias que responden a esta condición, las únicas en las cuales la onda puede conservarse, son -esto es lo magnífico en el descubrimiento de De Broglie- exactamente las órbitas permitidas en el modelo atómico de Bohr. Así, la idea de que ondas estacionarias están ligadas a los movimientos de los electrones, basta para proporcionar la llave de la selección de las órbitas”⁷⁶.

Había una forma de comprobar la existencia de estas ondas de materia: si los electrones también se comportan como ondas en ciertos casos, se tenía que poder observar el fenómeno de difracción, característico de los entes ondulatorios. Así fue, pues en 1925 Davisson y Germer observaron las manchas de difracción de un haz de electrones y las interferencias causadas por éstos cuando se encuentran con obstáculos o rendijas cuyo tamaño es menor o igual a la longitud de la onda asociada.

Cuando Davisson y Germer realizaron este experimento no conocían su significado, fue una experiencia independiente de las ideas de L. de Broglie, que lo dejaba explicado; más tarde George Thomson lo repitió. Este experimentador era el hijo de J.J. Thomson: su padre midió, por primera vez, la masa y la carga del electrón; el hijo midió, aunque no fue el primero, su longitud de onda.

⁷⁵ Cf. ANDRADE E SILVA, J./LOCHAK, G., Los cuantos, p. 110.

⁷⁶ PAPP, D., La doble faz del mundo físico, p. 125.

Lo único que faltaba era encontrar la expresión matemática de esta onda, la cual fuera capaz de explicar el comportamiento de las partículas materiales. Se pensó que, si esta expresión fuera hallada, el dualismo entre onda y corpúsculo se decantaría en favor de la onda.

c) La difracción del electrón: “Experimento de la doble rendija”

Siguiendo con la exposición de este capítulo acerca del contexto experimental y teórico, de dónde surgieron los problemas de los que después me ocuparé, examinaré ahora el “experimento de la doble rendija”. Es importante partir de este contexto físico y aceptar, voluntariamente, tal confinamiento teórico, el mismo en el que están inmersos los físicos, para poder ofrecer un análisis filosófico bien ponderado de sus principios y leyes fundamentales; esto es, para hacer epistemología y no perderse en divagaciones que, al final, nada tengan que ver con esta teoría física.

Pues bien, aquél es el “experimento cuántico” por excelencia, ya que muestra todas las características cuánticas esenciales: en concreto, el intrínseco carácter dual de la naturaleza; por ello, en todos los escritos sobre física cuántica siempre se acaba, o se empieza, aludiendo a él.

No obstante, no se trata de un experimento crucial, realizado en alguna época determinada; en realidad, es un compendio de experimentos que sí se realizaron históricamente, como el de Davisson y Germer, pero él, en sí mismo, es únicamente un ejemplo paradigmático de la situación cuántica. Este experimento se utiliza para ilustrar el gran problema con el que tuvieron que enfrentarse los físicos tras haber solucionado, una vez construida la física cuántica, los anteriores problemas⁷⁷; es decir, donde se describe a nivel experimental la dualidad onda-corpúsculo. Muestra que las partículas se comportan tanto como ondas como corpúsculos y que para

⁷⁷ Retrocediendo un poco, se recordará que los problemas que la nueva teoría atómica resolvió fueron los siguientes: catástrofe ultravioleta, las líneas de los espectros electromagnéticos de los elementos químicos, estabilidad del átomo de Rutherford, efecto fotoeléctrico y el misterio de la presencia de los números enteros en la condición cuántica del átomo de Bohr, entre otros no tan centrales como éstos. La solución de todos ellos llevó a la física a la necesidad de mantener la dualidad del modelo ondulatorio y corpuscular; en su momento expondré cómo esta dualidad fue disuelta a nivel matemático con los formalismos teóricos de Heisenberg y Schrödinger, pero, como Bohr puso de manifiesto, siempre reaparece cuando se quiere dar una interpretación física de ese formalismo, lo cual es indicio de que los mismos problemas, aunque camuflados por el nuevo aparato matemático, perduran tal y como aparecieron en las primeras fórmulas.

entender y comunicar el experimento, en todo su conjunto, se ha de disponer y mantener en Física ambos modelos explicativos, que se remiten al mismo objeto físico, pongamos el caso de un electrón.

Para el desarrollo de este apartado, me remitiré al artículo de Feynman⁷⁸ no sólo por ser la descripción más popular y extendida del experimento, sino por ser, además, una descripción técnica de éste: la exposición de Feynman es todo lo aséptica, limpia o libre interpretación, que puede llegar a ser una descripción realizada desde el llamado “lenguaje natural”⁷⁹, ya que, como el propio Bohr nos dice, toda descripción experimental y comunicación de los resultados requiere hacerse en el lenguaje ordinario y éste implica o contiene siempre una cierta carga interpretativa, la cual debemos explicitar para evitar las paradojas y contradicciones. Pero, de cualquier forma, la intención de Feynman es describir técnicamente el comportamiento de las partículas y no explicar el experimento y, en cierta medida, lo consigue⁸⁰.

Feynman estructura en cuatro pasos la descripción del experimento. Cuatro pasos que, en realidad, son cuatro experimentos distintos porque, al cambiar las circunstancias experimentales, estamos utilizando diferentes dispositivos de observación y de medida. Aun así, las condiciones generales en las que se realiza esta serie de experimentos son similares a la experiencia que realizó Young para captar el fenómeno de interferencias luminosas y demostrar, así, el carácter ondulatorio de la luz: tenemos una fuente, que emite las partículas que vamos a estudiar, o bien fotones o bien electrones; una primera placa con un sólo agujero, que selecciona las partículas con la trayectoria adecuada para el experimento; una segunda placa con dos ranuras, a veces ambas abiertas y otras veces sólo una de ellas, que las partículas han de atravesar; por último, una pantalla o cualquier mecanismo detector de la llegada de aquéllas.

⁷⁸ FEYNMAN, R., *Probabilidad e incertidumbre -la visión de la naturaleza a través de la mecánica cuántica*. En: El carácter de la ley física, pp. 109-127.

⁷⁹ Lenguaje cualitativo u ordinario; es decir, todo aquél que no es el lenguaje matemático.

⁸⁰ Aunque Feynman no pretende interpretar el experimento, cuando llega el momento de hablar de las interferencias, causadas por los electrones, asume que aquéllas se deben a la presencia de unas “ondas de probabilidad”, carentes de sustrato físico o material; es decir, la actitud que toma al hablar de las interferencias electrónicas es una aceptación de la interpretación estadística de Born como “ondas de probabilidad”, la cual, como se dirá más adelante, fue aceptada, incluso, por Einstein, ya que no existe nada que avale el sustrato material de estas ondas (salvo, quizás, el hecho de que causen interferencias).

Primeramente, expone el experimento que se realiza con balas y extrae la ley de no interferencia: $N_{12} = N_1 + N_2$, pues el número total de colisiones, N_{12} , que se producen cuando los dos agujeros de la placa están abiertos, es igual al resultado de la suma de las colisiones que se producen cuando las balas pasan sólo por el primer agujero, N_1 , más las colisiones de aquéllas que han pasado por el segundo cuando el primero estaba cerrado, N_2 . Por tanto, la probabilidad de llegada de las balas cuando ambos agujeros están abiertos es exactamente la suma de la media de llegada cuando el “agujero número 1” está abierto más aquella cuando el agujero abierto es el “número 2”. De esta manera, el experimento muestra las características corpusculares de las balas, pues, al medir el número de colisiones que se producen por término medio durante un cierto período de tiempo, se detecta que las balas han llegado siempre en unidades enteras y nunca dos al mismo tiempo⁸¹.

En segundo lugar, describe el mismo experimento ahora realizado con olas de agua y midiendo, no ya el número de colisiones, sino la intensidad o energía de sus ondas. Si uno de los agujeros está cerrado, las ondas no interfieren pues llegan todas desde el mismo “tren de ondas”; pero cuando ambos están abiertos, aparece la interferencia: $h_{12} = h_1 + h_2$, donde la altura de la curva total, cuando ambos agujeros están abiertos, es igual a la suma de las alturas por separado, pero, dado que tenemos dos trenes de ondas, que no tienen por qué llegar al mismo tiempo, las ondas interfieren entre sí con sus valles y sus crestas, provocando interferencias ahora constructivas, ahora destructivas, de tal forma que la intensidad total I_{12} no es la suma de las intensidades I_1, I_2 , cuando uno solo de los agujeros está abierto⁸². Por tanto, la intensidad no es igual a la suma de las alturas parciales sino al cuadrado de ésta: $I_{12} = (h_1 + h_2)^2$; de ahí que, cuando se mide la intensidad de las olas, puede comprobarse que tienen características ondulatorias, ya que han podido llegar dos ondas al mismo tiempo y con

⁸¹ Cf. FEYNMAN, R., *Probabilidad e incertidumbre -la visión de la naturaleza a través de la mecánica cuántica*, pp. 112-114 y figura 28.

⁸² Es decir, puede considerarse que la altura de la curva total, h_{12} , es igual a la suma de las alturas por separado, cuando uno de los agujeros está cerrado, porque h_1 puede representar, por ejemplo, la altura de la cresta de la onda (con un valor positivo) que pasa por el “agujero número 1” y h_2 la altura del valle de la onda (valor negativo) que pasa por el “agujero número 2”. Por esta razón, la intensidad no es igual a la altura sino a su cuadrado: $I_1 = (h_1)^2$; $I_2 = (h_2)^2$; $I_{12} = (h_{12})^2$.

diferentes magnitudes, lo cual indica que han tomado valores intermedios, es decir que no son enteros⁸³.

El tercer paso consiste en realizar el experimento con electrones o fotones para medir la probabilidad de llegada del electrón o del fotón, de la misma forma que lo medimos en el caso de las balas. Ahora tenemos un detector eléctrico que percibe la carga de cualquier electrón que impacte sobre él y lo que nos muestra es que los electrones han llegado como unidades enteras, esto es, con la misma magnitud⁸⁴; por tanto, pueden considerarse corpúsculos y se actuará del mismo modo que con las balas, esto es, midiendo su llegada al detector por término medio. Sin embargo, cuando colocamos el detector en distintos lugares (o muchos detectores en todas partes para obtener simultáneamente el valor de la distribución de todos los electrones), el experimento revela que su “probabilidad de llegada” obedece a la misma ley de interferencias que se da al medir la intensidad de las ondas. El resultado con ambos agujeros abiertos es una “curva de interferencias” producida no en el caso de la energía o intensidad de una onda, sino en el caso de la probabilidad de llegada de una *unidad entera*; por tanto, el “número de colisiones”, N , ahora se calcula del mismo modo que la “intensidad”, I y sólo se ha de cambiar la “altura”, h , por la “amplitud de onda”, a , que Feynman llama “amplitud de probabilidad”, ya que no puede entenderse como la altura de nada si esta “onda” es sólo un indicador de probabilidades sin ningún sustrato material. Así, tenemos que la probabilidad de llegada de los electrones, cuando ambos agujeros están abiertos, se mide como un fenómeno de interferencias provocado por la suma al cuadrado de la amplitud de probabilidad de llegar a través del “agujero número 1” más la amplitud de probabilidad de llegar a través del “agujero número 2”: $N_{12} = (a_1 + a_2)^2$. No obstante, cuando se tapa el “agujero número 2”, los electrones que pasan por el “agujero número 1” obedecen a la curva simple de distribución de las balas, N_1 , y viceversa; sin

⁸³ Cf. FEYNMAN, R., *Probabilidad e incertidumbre -la visión de la naturaleza a través de la mecánica cuántica*, pp. 114-116 y figura 29.

⁸⁴ Si la fuente emisora de electrones se debilita, llegan menos electrones pero con la misma magnitud. Además, nunca impactan dos al mismo tiempo, si la fuente es lo suficientemente débil para no emitir más de un electrón cada vez que ponemos en marcha el detector, pues si colocamos un segundo detector en otro lugar nunca se oirán dos “clics” a la vez. Esto significa que los electrones llegan en unidades enteras, con una magnitud determinada y uno después de otro.

embargo, con la suma de estas dos curvas, N_1 y N_2 , no se obtiene la forma cómo se distribuyen cuando los dos agujeros están abiertos⁸⁵.

Es interesante resaltar la manera como este experimento también sirve para ilustrar el grado de incompatibilidad conceptual que padecen las nociones de onda y corpúsculo: ambos son conceptos descriptivos, pero ofrecen distintos modelos o imágenes, pues sus estructuras, o características, espacio-temporales son excluyentes. La razón de esto es que la estructura espacial de un corpúsculo implica que llegará como una unidad entera (en un solo impacto); mientras que las ondas pueden llegar con diferente magnitud y adquirir valores intermedios (el valor de su unidad es continuamente divisible)⁸⁶. También es distinta e incompatible la estructura temporal de estos conceptos porque los corpúsculos llegan siempre uno después de otro (no hay dos al mismo tiempo) y las ondas no pues éstas interfieren entre sí llegando varias al mismo tiempo.

Por último, Feynman reproduce el mismo experimento que el anterior pero con la luz encendida para averiguar cuál ha sido el comportamiento del electrón durante el trayecto entre su emisión por la fuente y su recepción en la placa, ya que la distribución N_{12} , en el caso de los electrones, no se corresponde con la de las balas sino con la de las ondas; hecho que su naturaleza corpuscular deja sin explicación. Para ver por qué agujero ha pasado el electrón, cuando ambos están abiertos, se coloca una fuente con luz intensa detrás de los dos agujeros, de forma que al pasar contamos un “clic” y a continuación se ve un brillo: el electrón ha pasado entero por uno de los dos agujeros.

Por lo tanto, la distribución con luz del número de electrones que pasan por cada agujero, N'_1 y N'_2 , es igual a la distribución cuando no hay luz, N_1 y N_2 , sin embargo, el número total detectado de electrones, cuando los dos agujeros están abiertos, es igual a la suma de las contribuciones de N'_1 y N'_2 , como ocurría en el caso de las balas: $N'_{12}=N'_1+N'_2$. Es decir, no se han producido interferencias y los electrones se han comportado enteramente como corpúsculos, a pesar de estar abiertos ambos agujeros; con lo cual, es imposible observar el agujero por el que pasó el electrón sin destruir la interferencia, perturbando su distribución de llegada⁸⁷. Las

⁸⁵ Cf. FEYNMAN, R., *Probabilidad e incertidumbre -la visión de la naturaleza a través de la mecánica cuántica*, pp. 117-120 y figuras 30 y 31.

⁸⁶ El comportamiento dinámico de un corpúsculo se calcula utilizando números reales y el de las ondas con números imaginarios.

⁸⁷ Puede disminuirse la intensidad de la luz, pero el resultado será el mismo: pasarán electrones que veré, cuya distribución N'_{12} será la suma de sus componentes, y pasarán

partículas subatómicas se comportan de un modo diferente cuando se las observa: con luz su comportamiento es *racional*, los corpúsculos se comportan como corpúsculos; sin luz, vuelve la interferencia y con ella la dualidad⁸⁸.

Feynman extrae dos implicaciones de la situación que nos ha mostrado este experimento. La primera es que jamás podremos *predecir* por qué agujero pasó si no lo estamos mirando, es decir, observando y midiendo; de tal forma que la formulación, que él mismo hace del principio de indeterminación de Heisenberg, para adaptarlo a los términos de este experimento, es la siguiente:

“Es imposible construir un aparato que pueda determinar el agujero a través del cual pasa un electrón sin al mismo tiempo perturbar el electrón de forma suficiente como para destruir el modelo de interferencias”⁸⁹.

En cuanto a la segunda implicación es que cualquier objeto microfísico se comportaría exactamente igual que estos electrones: tal circunstancia es “una ley de la que no se puede escapar”; es una característica básica de la naturaleza, que puede formularse como la siguiente *proposición general*:

“La probabilidad de cualquier suceso en un experimento ideal es el cuadrado de a (a^2), la amplitud de probabilidad. Cuando un suceso puede ocurrir de diversas formas alternativas, la amplitud de probabilidad, este número a , es la suma de las a de cada una de las diversas alternativas. Si se efectúa un experimento capaz de determinar la alternativa seguida, la probabilidad de suceso cambia; es la suma de las probabilidades de cada alternativa. (Es decir, se pierde la interferencia)”⁹⁰.

electrones que no veré, cuya N_{12} será la consecuencia de una interferencia (suma al cuadrado de las amplitudes). La curva resultante de la distribución de electrones con luz muy tenue será una mezcla de las dos curvas N_{12} y, a medida que la luz se debilita, se va pareciendo más a N_{12} , la curva con interferencias.

⁸⁸ Cf. FEYNMAN, R., *Probabilidad e incertidumbre -la visión de la naturaleza a través de la mecánica cuántica*, pp. 121-123.

⁸⁹ Ibid, p. 123.

⁹⁰ Ibid, p. 124.

Por este motivo, hasta que el electrón no pasa por uno de los agujeros no sabemos por dónde lo *hará* o por dónde se le *verá* hacerlo; es decir, no puede predecirse por qué agujero pasará un electrón ni tan siquiera con el experimento de la luz encendida: “Sólo sé que cada vez que miro pasa por uno de los dos agujeros; pero no hay manera de anticipar por cuál de los dos va a pasar. El futuro, en otras palabras, es impredecible”⁹¹.

Sólo conocemos probabilidades y estas probabilidades están en las leyes fundamentales de la física porque en la mecánica cuántica el indeterminismo es físico y no gnoseológico. Esto quiere decir que estas probabilidades (o carencia predictiva) no tienen el mismo origen que en la física clásica: donde las probabilidades se debían a trabajar con un gran número de moléculas que complicaban demasiado los cálculos y, por tanto, aquéllas obedecían a la falta de conocimientos detallados; ahora, las probabilidades son una característica esencial de la naturaleza:

“No es nuestra ignorancia de los mecanismos internos, de sus innumerables complicaciones, lo que hace que la naturaleza parezca contener probabilidades. Parece ser algo intrínseco a ella”⁹².

Este “algo intrínseco”, que Feynman no explicita, es, según mi propia explicación, que la naturaleza tiene un doble comportamiento: corpuscular y ondulatorio. Esta dualidad inherente a la naturaleza es la responsable de las probabilidades: si utilizo un mecanismo de interferencias, “es imposible analizar el experimento en términos de que los electrones pasan por el agujero nº 1 o el nº 2”⁹³, porque las curvas resultantes son distintas: por un lado, la curva final de interferencias; por

⁹¹ Ibid, p. 125.

⁹² Ibid, p. 126. El indeterminismo gnoseológico sólo concede un valor subjetivo a estas relaciones, de ahí que las probabilidades, como producto de la incertidumbre gnoseológica, sólo se deban a nuestro conocimiento imperfecto e incompleto. Feynman advierte que si les concedemos a las probabilidades este significado meramente subjetivo, nos encontramos con la postura de la teoría de variables ocultas: una información más completa, aún desconocida, daría cuenta de las predicciones exactas. En esta teoría el determinismo seguiría presente en una realidad más profunda y las probabilidades de la física cuántica serían de la misma naturaleza que en la teoría clásica. Sin embargo, concluye que esta interpretación subjetiva del indeterminismo es errónea porque no tiene en cuenta que las probabilidades no se refieren a nuestra ignorancia sino a algún hecho esencial de la naturaleza y que, por tanto, el indeterminismo es físico y tiene un valor objetivo pues es inherente a la naturaleza misma.

⁹³ Ibid, p. 126.

otro, la contribución como probabilidades de las curvas nº 1 y nº 2. Esto quiere decir que, para poder predecir por qué agujero pasará, las curvas debían de haber sido iguales, es decir, la curva final debía ser igual a la suma de los que pasan por el nº 1 y el nº 2, como sí ocurre en el caso de las balas, ya que las balas tienen un carácter corpuscular inequívoco, con una posición y velocidad bien definidas, lo que permite un sencillo cálculo de su trayectoria, siguiendo las leyes de la mecánica clásica. Sin embargo, este carácter corpuscular, en el caso de los electrones, no se manifiesta en el resultado de un experimento con interferencias, es decir, cuando hay dos agujeros:

“Es por lo tanto imposible tener por anticipado cualquier información que nos indique el agujero por el que pasará el electrón, tanto si la luz está encendida como si no, cuando el experimento está montado de tal forma que con la luz apagada se obtienen las interferencias”⁹⁴.

Por esta razón, no es “nuestra ignorancia” la responsable de las probabilidades y de la carencia predictiva, sino que haya interferencias *cuando no deben existir* según el modelo clásico de corpúsculo. Al cual tampoco puede renunciarse por dos razones: por un lado, tenemos que al observarlo con luz, vemos su posición correspondiente a un corpúsculo y no una onda y, por otro lado, nos encontramos con que el resultado de una colisión concreta, que ha sido causada por un electrón, se corresponde con la estructura espacial y temporal de un corpúsculo: espacial porque llegan en un impacto (una unidad entera) y temporal porque no se producen dos impactos al mismo tiempo. Este comportamiento corpuscular es inexplicable desde el modelo ondulatorio: dos ondas pueden llegar al mismo tiempo y también con diferente magnitud (continuamente divisible); pero, las interferencias que muestran los electrones en la distribución total, cuando no son observados, sólo pueden producirlas las ondas. Por todo esto ambos modelos son irreductibles entre sí y conceptualmente incompatibles, al mismo tiempo que indispensables para explicar el comportamiento de los objetos microfísicos.

¿Cuál es la explicación de esto? ¿Qué mecanismo es el causante de esta situación? Feynman dice que no hay explicación⁹⁵, pero está

⁹⁴ Ibid, p. 126.

⁹⁵ “La cuestión es ahora saber cómo realmente funciona. ¿Qué mecanismo es el causante de todo esto? Nadie sabe de ningún mecanismo. Nadie puede darles una explicación del fenómeno más profunda que la que yo he dado; o sea, una mera descripción”. Ibid, pp. 124-125.

equivocado. En realidad, al reformular el principio de indeterminación en los términos de este experimento, pierde la posibilidad de llegar hasta el “mecanismo causante” de todo esto; pues, sí hay un responsable del resultado de este experimento y, por tanto, del carácter dual de la naturaleza: la discontinuidad cuántica que introduce la constante de Planck. Pero, no me detendré ahora en esta explicación, posponiéndola para el próximo capítulo⁹⁶.

La situación hasta este momento ha quedado así: con las ondas materiales de de Broglie se consiguió dar una explicación completa de la presencia de los números enteros en los nuevos fenómenos cuánticos relacionados con la radiación; sin embargo, a cambio de esto, el problema de la dualidad onda-corpúsculo se agravó, debido al progresivo afianzamiento y protagonismo que adquirió dentro de la teoría cuántica. A continuación expondré la actitud que tomó Bohr y su primera reacción ante el hecho de encontrarse con el doble modelo explicativo para la radiación.

d) La continuidad del campo electromagnético y la continuidad electrodinámica y mecánica

¿Cuál fue la postura de Bohr ante el problema de la dualidad entre las dos teorías acerca de la propagación de la radiación en el vacío? Bohr, como la mayoría de los físicos, no estaba dispuesto a renunciar a la teoría ondulatoria de la luz, porque sólo ella explicaba los fenómenos de interferencia y difracción, e incluso mantuvo su oposición a la teoría de Einstein hasta 1926, cuando ya casi todos los físicos habían aceptado la

⁹⁶ El experimento de la “doble rendija”, dice Feynman, contiene “todo el misterio” de la física cuántica. La razón es que nos revela los tres problemas básicos con que la física cuántica se enfrenta al realismo: indeterminismo, interacción de la observación, fracaso de los modelos visuales. Citando a Selleri: “Debería recalcarse que esos problemas no están desconectados: de nada vale poner el énfasis en la realidad de los objetos atómicos si en principio no son comprensibles. Sin comprensibilidad la realidad física se transforma en un fantasma en la penumbra, aislado para siempre de nosotros y misterioso; sin causalidad es imposible visualizar, de manera completa, la evolución de un proceso físico”. (SELLERI, F., *El debate de la teoría cuántica*, p. 48). Este problema a un nivel más profundo (que el que expone Feynman), es decir, las implicaciones epistemológicas de la dualidad, lo retomaré dentro del apartado 3.1, en “La relevancia epistemológica de la difracción del electrón: el *mecanismo* de la dualidad onda-corpúsculo”, siguiendo a de Broglie cuando expone el conflicto con el marco clásico, subrayando dos aspectos: la presencia de h (discontinuidad en el seno de la naturaleza) y la incompatibilidad de las propiedades geométricas y dinámicas.

existencia de los fotones. Bohr al principio no mostró interés por el problema físico de la dualidad onda-corpúsculo porque lo desestimó como tal problema, ya que no le concedió ninguna validez a la teoría de los fotones, pero el que sí le preocupó fue el de la dualidad entre la continuidad electrodinámica y la discontinuidad cuántica.

La física clásica mantiene que la continuidad puede ser de dos tipos: una acerca de cómo se transmite la radiación en el vacío, siguiendo el modelo ondulatorio de la teoría electromagnética, del cual hablé en el capítulo anterior, y la otra acerca de cómo esta radiación intercambia energía con la materia, según el modelo electrodinámico, mecánico y termodinámico, de la continuidad de los procesos energéticos⁹⁷. Bohr consideró a esta última como el tipo de continuidad esencial sobre la que había que discutir, pues era la que había sido negada por la introducción de la discontinuidad en los intercambios energéticos de la teoría cuántica; sin embargo, sobre ella se apoyaba la continuidad electromagnética de la noción de campo, que era la imagen que él pretendía mantener frente a la discontinuidad de la teoría de Einstein, pues aquella implica una interacción también continua con la materia en los procesos de absorción y emisión.

Así, en cuanto al primer tipo de continuidad, la del modelo ondulatorio para la luz, no sólo no lo consideró desmentido por la teoría cuántica, sino que su propósito era defenderlo frente al modelo corpuscular, que ofreció Einstein para la radiación electromagnética en su explicación del fenómeno fotoeléctrico⁹⁸. No obstante, al hacer esto se encontrará con otro tipo de dualidad: ¿cómo explicar que la energía se transmite por el vacío de modo continuo, en forma de ondas, pero sólo se emite y se absorbe discontinuamente, a través de las cantidades discretas que establecen los cuantos?

De manera que, durante estos años, el problema que suscita la dualidad en los intercambios energéticos fue el que Bohr consideró de naturaleza física y no el de la dualidad onda-corpúsculo⁹⁹, siendo ésta la cuestión que más le preocupó hasta 1925. Esto es, la de cómo conciliar el carácter continuo de la noción de campo electromagnético con el discontinuo que la Naturaleza parecía mostrar en sus procesos de emisión y

⁹⁷ Cf. MURDOCH, D., *Niels Bohr's Philosophy of Physics*, p. 32.

⁹⁸ Cf. *Ibid.*, pp. 20-21.

⁹⁹ Desde aquél Bohr llegará a este último a través del problema del contenido físico de las ecuaciones, pero no desde su aceptación directa como un problema físico, ya que Bohr mantuvo una postura en contra de la realidad física de los fotones, a los que consideraba un mero artificio matemático.

absorción de energía. Y es que durante estos años aún pensaba que podría haber una reconciliación entre la física clásica, con su modelo de continuidad, y la teoría cuántica. En un principio, Bohr sólo vio en el modelo de Einstein el modo de demostrar cómo se combinan las ideas de continuidad y discontinuidad en los intercambios de energía entre materia y radiación. De tal modo que, este modelo sólo tendrá para él un valor parcial y heurístico, en la medida en que muestra las dificultades que surgen al reconciliar la discontinuidad esencial de los procesos atómicos en los intercambios energéticos con la imagen de continuidad supuesta en la electrodinámica clásica. Éste era el problema: ¿cómo algo que es emitido y absorbido en forma de cantidades discontinuas puede transmitirse por el espacio continuamente, es decir, en forma de ondas?

La única solución que encontró fue abandonar los principios de conservación para conseguir mantener este modelo ondulatorio de transmisión de la radiación en el contexto de la discontinuidad cuántica¹⁰⁰, y poder rechazar el modelo corpuscular de Einstein, en el cual la radiación no sólo intercambia energía con la materia discontinuamente, sino que también es de este modo como se propaga a través del espacio, libre de interacciones con la materia.

Así, entre 1921 y 1924 Bohr pensaba que la conservación estricta del impulso y la energía no se producía en las interacciones individuales, y que sólo se conservan estadísticamente para un determinado número de transiciones¹⁰¹. Desde esta postura pretendía dar una explicación del fenómeno de la radiación en la que se combinara la propagación continua de la radiación en el vacío con la discontinuidad de los intercambios energéticos entre ésta y la materia, es decir, se resistía a abandonar del todo la teoría clásica y buscaba el modo de conjugarla con las nuevas ideas de la teoría cuántica. Con este fin nació la Teoría de Bohr-Kramers-Slater, desde la que se buscó dar una explicación del efecto Compton en dichos

¹⁰⁰ “Nevertheless, if Bohr desired to retain the field description of electromagnetic phenomena, then the interactions between radiation and atomic systems could not be accounted for with any strict consistency, for the field, by its classical definition, changed its state continuously. Because of his reluctance to accept the photon hypothesis, he cast about for some other break with the classical framework which would allow him to retain the field representation of radiation and yet describe the interaction between radiation and atomic systems. For a time he believed that this break would require abandoning strict energy conservation.” FOLSE, H., *The philosophy of Niels Borh*, p. 72.

¹⁰¹ Cf. BALIBAR, F./DARRIGOL, O./JECH, B. (rec.), *L'article de Bohr, Kramers et Slater (BKS)*, (EINSTEIN, A., *Quanta. Mécanique statistique et physique quantique*, pp. 162-169).

términos¹⁰². Recuérdese que el objetivo del experimento de Compton fue aportar una prueba de la existencia de los fotones, para lo cual era necesario que los principios de conservación del impulso y de la energía fueran respetados manteniendo su total validez. Por ello la refutación de este experimento desde la teoría de Bohr-Kramers-Slater debía partir del rechazo de los principios de conservación.

No obstante, Bohr tuvo que renunciar a esta teoría en 1925 cuando, dejando a un lado las objeciones de Einstein y Pauli, los experimentos de Bothe-Geiger y los de Compton-Simon revelaron que las leyes de conservación también eran aplicables a los procesos cuánticos individuales. Bohr consideró que la renuncia a esta teoría implicaba que la noción de campo de la continuidad electromagnética no podía seguir manteniéndose firmemente frente a la teoría de los fotones, aunque ello no significó la aceptación de que dicha teoría se impusiera de manera unilateral, sino más bien un cierto reconocimiento de la dualidad onda-corpúsculo, a través de la idea acerca de que los resultados de estos experimentos mostraban la imposibilidad de llevar a cabo una descripción espacio-temporal de las interacciones entre materia y radiación¹⁰³.

Por tanto, la conclusión a la que llegará más adelante es que los conceptos de onda y partícula son simples *modelos formales*, cuya aplicabilidad a aquello que de hecho ocurre en el mundo atómico no es inmediata. A partir de este cambio de enfoque del problema, la dualidad onda-partícula dejó de ser un problema físico y pasó a otro plano, el de la epistemología¹⁰⁴.

Éste será el punto de partida en las reflexiones de Bohr acerca de los problemas que suscita el carácter dual de la Naturaleza: los límites que la realidad física impone al uso que hacemos de nuestros modelos a la hora

¹⁰² Cf. FOLSE, H., The philosophy of Niels Bohr, pp. 74-76.

¹⁰³ Cf. MURDOCH, D., Niels Bohr's Philosophy of Physics, pp. 29-31; y también: FOLSE, H., The philosophy of Niels Bohr, pp. 77-78. Esta conclusión de Bohr es de gran importancia, porque la renuncia a la descripción espacio-temporal tendrá graves consecuencias, que analizaré en el próximo capítulo.

¹⁰⁴ En el sentido de que esta dualidad será la que guiará a Bohr en la búsqueda de la interpretación física del formalismo de la mecánica cuántica: "What Bohr means is that the difficulties in the interpretation of the quantum theory are not due to inadequacies in the mechanical concepts of the theory, but to inadequacies in the models used for its interpretation". *Ibid*, p. 31.

de describirla¹⁰⁵. Aunque, de momento, Bohr había puesto su confianza en el desarrollo de un nuevo esquema matemático, que aclarara toda la confusión que la aparición de las ideas cuánticas había engendrado en el núcleo de la física.

2.3) El Formalismo Matemático de la Teoría Cuántica

En plena batalla entre las ondas y los corpúsculos los físicos sólo disponían de la “vieja teoría atómica” de Bohr, a la cual le costaba cada vez más hacer buenas predicciones, según se iba ampliando el campo de experiencia y apareciendo nuevos fenómenos.

En medio de esta confusión se abrieron dos frentes en busca del formalismo matemático que diera cuenta de los nuevos fenómenos desde una teoría con consistencia matemática: uno se basó en el modelo ondulatorio de de Broglie, y el otro partió de la discontinuidad y del principio de correspondencia, propuesto por Bohr para completar su teoría del átomo de hidrógeno¹⁰⁶.

a) El principio de correspondencia de la “primera teoría atómica” de Bohr

El principio de correspondencia fue fruto de la tentativa de Bohr de reconciliar la continuidad de la electrodinámica clásica con el carácter discontinuo de los postulados cuánticos. Bohr concibió este principio como una consecuencia de su postulado cuántico¹⁰⁷, en el que el cuanto de energía $h\nu$, de la radiación emitida, es igual a la diferencia energética entre dos de sus estados estacionarios, produciéndose una transición. Cuando estas diferencias convergen aproximándose al mismo valor, la frecuencia de la radiación tenderá a cero, encontrándonos entonces en una región límite de la teoría cuántica del átomo de hidrógeno.

¹⁰⁵ Bohr disolverá el problema de la dualidad a costa de renunciar a un “poco de realismo” en su interpretación de la física, aunque no se perderá todo, sólo el ideal del realismo científico acerca del representacionismo pictórico de sus conceptos descriptivos.

¹⁰⁶ Cf. HEISENBERG, W., *Física y Filosofía*, p. 25.

¹⁰⁷ Cf. MURDOCH, D., *Niels Bohr's Philosophy of Physics*, p. 38.

De tal forma que, en este límite no sólo se corresponden los resultados de la electrodinámica clásica con los de la teoría cuántica de Bohr, sino que también se vuelve aplicable el modelo de radiación de la teoría clásica para la radiación de bajas frecuencias. En 1913 llamó “analogía” a esta coincidencia con la física clásica¹⁰⁸, desde la que enunció el principio de correspondencia¹⁰⁹.

Aquello que este principio ofreció fue la posibilidad de utilizar las teorías clásicas para obtener datos a los que no podía acceder la primera teoría cuántica del átomo, como por ejemplo, la intensidad de las rayas espectrales.

Para conseguir esto, primero se realizaban los cálculos según el formalismo clásico, y después se adaptaban a las nuevas condiciones, añadiendo los números cuánticos y dándoles la forma de las nuevas leyes. Sin embargo, el principio de correspondencia no podía ser aplicado con rigor debido al hecho de que aquel límite fuera *asintótico*, es decir, a que la equivalencia entre los valores no era exacta, sólo aproximativa, ya que, dentro de la propia teoría cuántica, h nunca podrá alcanzar el valor cero.

En consecuencia, no se tenía una idea clara de cómo seguir este proceso de transformación de los datos obtenidos, a través de los procedimientos clásicos, en datos útiles para el cálculo cuántico de los nuevos fenómenos atómicos. Sólo la intuición de Bohr era capaz de llevar a cabo el propósito, con el que nació, de servir de guía metodológica para aplicar las nuevas leyes cuánticas.

Aun así, el principio de correspondencia y su “vieja teoría atómica” prestaron sus servicios a la ciencia durante la primera década de su desarrollo¹¹⁰, la cual explicó, junto con sus posteriores correcciones, el espectro del átomo de hidrógeno, el origen de los rayos X, se pudo prever y calcular el efecto Zeeman y el efecto Stark, el diámetro del átomo, su energía de ionización.

¹⁰⁸ Cf. BOHR, N., “La teoría atómica y la mecánica” (1925), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, pp. 82-84.

¹⁰⁹ Cf. MURDOCH, D., Niels Bohr's Philosophy of Physics, p. 38. En la misma página escribe: “It is a consequence of Bohr's theory of the hydrogen atom that in the limiting region of high quantum numbers the difference between the energies of consecutive stationary states converges to zero. (...) The correspondence principle is a generalisation of these implications of Bohr's theory of the hydrogen atom: it states that in general, for high quantum numbers, the results yielded by the quantum theory must coincide approximately with those derived from the classical theories”.

¹¹⁰ Cf. BOHR, N., “La teoría atómica y la mecánica” (1925), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, pp. 85-93.

Por ejemplo, en un principio la teoría de Bohr no explicaba el desdoblamiento de las rayas espectrales en un campo magnético (el anómalo efecto Zeeman) ni por qué se saturan las órbitas, obligando a los electrones a distribuirse entre diversas órbitas; sin embargo, esto lo explicó la introducción del *spin*, el cuarto número cuántico, doble-valuado, con el que se completó el grupo de números que determinan los estados energéticos de los átomos más pesados donde no todos los electrones pueden acabar en el estado fundamental, que es el más estable, y a partir del cual Pauli pudo explicar por qué las órbitas se saturaban, haciendo que los restantes electrones ocuparan las órbitas más exteriores, aun siendo más inestables que la fundamental¹¹¹. Por otro lado, el efecto Stark se explicó tras la introducción del tercer número cuántico, el cual ayuda a determinar los valores discontinuos del espacio cuantizado, que sólo puede tomar el ángulo que forma la dirección del campo magnético con los planos de las órbitas electrónicas¹¹².

Hablando en general, esta primera teoría atómica aclaró el mecanismo de los espectros, la estructura de los elementos químicos, reveló el tipo de organización lógica que sigue la tabla de Mendelejev y el porqué de la saturación de las órbitas, situación ésta que determina las propiedades químicas de los diferentes elementos¹¹³, coincidiendo los números enteros que aparecen en estas experiencias con los números previstos por la teoría de Bohr.

Pero no conseguía explicar los espectros de los átomos más complejos ni determinar sus estados de energía, como los del átomo de helio. Y es que aquellos éxitos se consiguieron a cambio de introducir la

¹¹¹: “Cada una de las capas de Bohr correspondía a un conjunto de números cuánticos, y Pauli se dio cuenta en 1925 de que con la adición de su cuarto número cuántico para el electrón, el número de electrones en cada capa completa corresponde exactamente al número de *diferentes* conjuntos de cuatro números cuánticos asociados a esa capa. Formuló lo que hoy se conoce como el Principio de Exclusión de Pauli, según el cual dos electrones no pueden tener nunca el mismo conjunto de números cuánticos, proporcionando así una razón para justificar la forma de llenarse las capas de átomos cada vez más pesados”. GRIBBIN, J., En busca del gato de Schrödinger, p. 80. No obstante, a pesar de su enorme poder aclaratorio, el principio de Pauli no se deduce de la teoría cuántica sino, de los datos espectroscópicos, con lo cual aún no se comprende por qué algunas partículas obedecen al Principio de Exclusión ni por qué otras no, como los fotones.

¹¹² Cf. PAPP, D., La doble faz del mundo físico, p. 111.

¹¹³ “El número de cuerpos químicos se manifiesta igual al número de las combinaciones posibles ofrecidas por el principio de Pauli a la legión de los electrones para sus agrupaciones alrededor del núcleo”. PAPP, D., La doble faz del mundo físico, p. 115.

oscuridad y las contradicciones propias de una teoría híbrida, en la que se mezclan elementos de dos teorías que carecen de relación lógica entre ellas y, por tanto, su falta de fundamento y su conjugación arbitraria, a través del principio de correspondencia, con el tiempo se volvió estéril. Se necesitaba una nueva teoría más completa, e independiente de la teoría clásica, pues ésta no parecía capaz de proporcionar la base teórica que los nuevos fenómenos demandaban para su explicación.

b) El álgebra no-conmutativa de la mecánica matricial

En 1926 Schrödinger, ante el problema de la dualidad onda-corpúsculo, partió de la idea de que son las ondas las que se han de imponer sobre los corpúsculos, siendo aquéllas las únicas con realidad física. Mientras que en 1925 Heisenberg ignoró el problema de la dualidad con la intención de elaborar un esquema matemático que sólo diera cuenta de las *magnitudes observables*¹¹⁴, tales como la frecuencia y la intensidad de las líneas espectrales, renunciando a los conceptos de onda y partícula, a los que consideró prescindibles por no aportar datos matemáticos relevantes para la construcción del formalismo adecuado a los nuevos fenómenos cuánticos¹¹⁵. Seguiré con el orden cronológico de estos descubrimientos teóricos y me detendré primero en la mecánica de matrices.

Heisenberg introdujo por primera vez en física el cálculo matricial, que los matemáticos conocían desde el siglo XIX¹¹⁶, con la finalidad de describir no un estado atómico, sino asociaciones entre pares de estados y sus interacciones, porque todas las características observables se refieren a

¹¹⁴ El término “observable” ya no se referirá a nada visualizable, como ocurría en física clásica, sino a aquello que podemos medir y calcular. Por tanto, se producirá un cambio en la noción de observación: ahora es, exclusivamente, sinónimo de medición. La razón es lógica: en física cuántica ya no pueden mediar en la observación nuestros sentidos, sino únicamente los efectos cuánticos en los dispositivos de medida macroscópicos. Como estos resultados se vuelven contradictorios si los vinculamos a cualquier imagen, ya sea corpuscular u ondulatoria, Heisenberg renuncia a introducir ningún modelo visual en la descripción física del fenómeno y a asociar la observación de éstos con ninguna representación espacio-temporal.

¹¹⁵ Si bien es cierto que en su mecánica subyacía la idea del electrón como una partícula que pasa de un estado energético a otro, dado que Heisenberg partió de los postulados de Bohr.

¹¹⁶ Esta rama de las matemáticas fue desarrollada por William Hamilton, y se utilizó como ayuda para el cálculo de las órbitas de ciertos planetas que están en interacción en el Sistema Solar. Cf. GRIBBIN, J., En busca del gato de Schrödinger, pp. 87-92.

dos estados de energía: estas características sólo se observan cuando se realiza una transición de un estado a otro. Esta descripción matemática no se podía lograr con números ordinarios, y así fue como Heisenberg redescubrió las matrices disponiendo los pares de números en forma de tablas.

La peculiaridad de las matrices, o tablas de números, es que contienen un álgebra no conmutativa: cuando dos de esas tablas se “multiplican” entre sí, el resultado no es el mismo si se altera el orden de los factores, es decir, aquél depende del orden en que estén dispuestas las matrices a la hora de realizar la operación: $ab \neq ba$. Al poco tiempo de que la revista *Zeitschrift für Physik* publicara el artículo de Heisenberg, Pascual Jordan, Max Born y el propio Heisenberg trabajaron en otro artículo más extenso y explícito donde se resaltaba la importancia de que las matrices no conmutaran. Born y Jordan habían encontrado la *relación mecánico-cuántica fundamental*, siguiendo el camino que ellos abrieron al desarrollar el formalismo matemático de las ecuaciones, que había iniciado Heisenberg.

Cuando Dirac analizó las nuevas ecuaciones se dio cuenta que de esta relación se desprendía la siguiente observación: “... las ecuaciones de la mecánica cuántica tienen la misma estructura matemática que las ecuaciones de la mecánica clásica, y que ésta es un caso particular de la cuántica correspondiente a grandes números cuánticos, o a dar el valor cero a la constante de Planck”¹¹⁷. Por consiguiente, una vez que Dirac hiciera este descubrimiento, muchos problemas se resolvieron buscando las ecuaciones clásicas, adecuadas a la situación cuántica que se estaba estudiando, las cuales se transcribían posteriormente en forma de matrices. Hecho que, en realidad, era la idea básica propuesta por el principio de correspondencia.

No obstante, aunque con este formalismo se solucionaron los problemas matemáticos y técnicos a la hora de precisar los cálculos, aparecieron otros problemas de una índole distinta: problemas epistemológicos, que marcaron el conflicto de esta teoría con la física clásica cuando salieron a la luz las diferencias conceptuales entre ambas físicas. Este conflicto, que analizaré en el siguiente capítulo, arranca de una diferencia esencial en los procedimientos matemáticos de una y otra: la mecánica clásica usaba el cálculo de derivadas, que, por supuesto, contenía un álgebra conmutativa; en cambio, el cálculo matricial se caracteriza por no permitir la conmutabilidad de las matrices.

¹¹⁷ *Ibid*, p. 92.

La propiedad no conmutativa de las matrices de Heisenberg se pone de manifiesto en la “relación mecánico-cuántica fundamental”, según la cual: $pq - qp = \hbar/i$, donde p y q son dos matrices que representan el momento (o el impulso) y la posición de las partículas atómicas, \hbar es la forma abreviada de escribir $h/2\pi$ e i es la unidad imaginaria¹¹⁸, que es igual a $\sqrt{-1}$.

La inconmutabilidad de las matrices del impulso y de la posición significa que es imposible medirlas a la vez con exacta precisión: “Las matemáticas que aseguran que $pq \neq qp$ también afirman que nunca se puede saber con certeza el valor de p y q ”¹¹⁹. Esta inconmutabilidad, extraña a la física clásica, está regida por la presencia de \hbar y de ella se derivará el principio de indeterminación no como una limitación experimental, sino como un hecho esencial de la Naturaleza, que se dedujo de las ecuaciones fundamentales del formalismo cuántico y no de ninguna experiencia.

Sin embargo, esta imprecisión en el conocimiento de la posición y el momento no sólo está de acuerdo con los hechos experimentales, sino también con la situación de la física cuántica en torno a la dualidad onda-corpúsculo. Si partimos de que la posición es una propiedad esencialmente corpuscular, y que las ondas poseen momento, pero no localización precisa, el hecho de que, al medir primero una de estas propiedades, sacrifiquemos la exactitud en la otra, explica que la Naturaleza esconda uno de los aspectos de la dualidad cuando manifiesta el otro¹²⁰:

“Cuanto más se conoce sobre el aspecto ondulatorio de la realidad, menos se conoce sobre su faceta corpuscular, y viceversa. Los experimentos diseñados para detectar partículas siempre detectan partículas, los experimentos diseñados para detectar ondas siempre detectan ondas. Ningún experimento muestra al electrón comportándose simultáneamente como una onda y como una partícula”¹²¹.

¹¹⁸ El astrofísico John Gribbin advierte que la presencia de i debió haber alertado a los físicos de no haber estado tan confusos primero por la aparición de \hbar y después por la introducción de las matrices con su extraña característica de no conmutatividad, ya que este número imaginario aparece en ecuaciones que generalmente implican oscilaciones u ondas. Cf. *Ibid*, p. 90.

¹¹⁹ *Ibid*, p. 101.

¹²⁰ Sobre esta peculiar característica de la dualidad se apoyará Bohr para hablar de fenómenos complementarios y de comunicación inambigua en el conocimiento obtenido a través de los dispositivos experimentales, siempre y cuando, en la descripción del fenómeno, incluyamos información acerca del tipo de dispositivo concreto que hemos utilizado.

¹²¹ GRIBBIN, J., En busca del gato de Schrödinger, p. 102.

A pesar de la importancia que tiene esta consecuencia, de momento no me extenderé en ella; sólo mostraré, a continuación, que a esta misma conclusión se llega por las ecuaciones de la mecánica ondulatoria, pero, también ocurre con el formalismo de los números q de Dirac¹²². Sin embargo, Heisenberg partió de cantidades discretas y de un álgebra no conmutativa, y Schrödinger de cantidades continuas y ecuaciones diferenciales, pero ambas teorías contenían en sus fórmulas el valor de la constante de Planck, h . Una de las consecuencias de aquella conclusión será que “toda operación de medición de un sistema microfísico provoca automáticamente una alteración de ese sistema”¹²³.

c) *La mecánica ondulatoria y el colapso de Ψ*

Por su parte, Erwin Schrödinger encontró en 1926 la ecuación matemática de la *onda de de Broglie*:

$$\delta^2\Psi/\delta x^2 + \delta^2\Psi/\delta y^2 + \delta^2\Psi/\delta z^2 - 8\pi^2 m/h^2 V(x,y,z,t)\Psi = 4\pi im/h - \delta\Psi/\delta t$$

Ésta ecuación daba cuenta de los fenómenos de difracción e interferencias de las ondas materiales, al tiempo que reducía la teoría cuántica a una concepción ondulatoria de las partículas, tanto si son materiales como si son fotones de luz, siguiendo el camino que había abierto de Broglie. Éste era, precisamente, su objetivo principal: ofrecer el modelo de onda como la única imagen explicativa del comportamiento de todos los fenómenos, en detrimento de la noción de corpúsculo.

“Si se consideran sus cálculos al pie de la letra, se imagina al átomo como una especie de membrana vibrante que se extiende hasta el infinito y palpita al ritmo de las frecuencias de Bohr. Mientras que para de Broglie una partícula subsistía en el seno de la onda, en la imagen que dio Schrödinger la partícula ha desaparecido, nada permite

¹²² Cf. *Ibid*, p. 137.

¹²³ ORTOLI, S./PHARABOD, P., *El cántico de la cuántica*, p. 42. Aunque esta interpretación, como una perturbación del sistema, se modificó más adelante del siguiente modo: “las partículas tienen propiedades análogas a la velocidad y a la posición, sólo que son propiedades más vagas, que adquieren consistencia únicamente en el momento de una medición”. *Ibid*. Las relaciones de incertidumbre se consideraron la expresión matemática de este hecho, expresando las posibilidades de precisión de tal vaguedad.

distinguir los granos de materia, el Universo está poblado de ondas y sólo de ondas”¹²⁴.

El éxito de esta ecuación fue rotundo: desde ella se podían calcular las líneas de todos los espectros atómicos y sus intensidades; todos los fenómenos cuánticos y todos los resultados conocidos por la teoría atómica se deducían de ella. Esta ecuación fue perfeccionada por Dirac unos años más tarde, quien le dio una forma relativista para que fuera también válida en el caso de las partículas dotadas de grandes velocidades, desde la cual la rotación del electrón en torno a su eje se convirtió en una exigencia de la teoría, que seguía fielmente a esta ecuación de propagación de las ondas materiales¹²⁵. Además, llevó a una predicción, cuya constatación experimental sería la prueba más evidente de la validez de la ecuación de Schrödinger y Dirac: se predijo la existencia de la “antimateria” en la forma de “antielectrones”, que son electrones con carga positiva, debido a que la fórmula relativista admitía como soluciones no solamente electrones con energía positiva, con su tradicional carga eléctrica negativa, sino también con energía negativa. Fue en 1933 cuando los experimentos de Anderson revelaron la existencia de este electrón con carga positiva, al que se le llamó *positrón*.

Ahora, examinaré los elementos que contiene esta *ecuación de ondas* y su significado. La función Ψ es la función que satisface la relación entre las magnitudes de la ecuación diferencial de Schrödinger, las cuales describen en términos ondulatorios la evolución del sistema microfísico. El hecho de que esta ecuación describa los objetos cuánticos en términos ondulatorios implica que su localización espacial no será puntual, sino que abarcará una determinada región del espacio entre la que se dispersa su posición¹²⁶.

Es una función compleja, ya que contiene dos tipos de información: una relativa a la localización y la otra acerca de la energía. Aunque la primera no se refiere a una coordenada puntual, sino a una zona del espacio, ésta está perfectamente definida, de tal modo que, dentro de la

¹²⁴ ANDRADE E SILVA, J./LOCHAK, G., *Los cuantos*, p. 116.

¹²⁵ Cf. PAPP, D., *La doble faz del mundo físico*, pp. 135-136.

¹²⁶ No obstante, algo más tarde se demostró, como ya explicaré en su momento, que esta onda no es nada material, sino que se definió como una *onda de probabilidad*, de donde se deduce que la ecuación no describe al objeto ocupando una posición en el espacio, sino la probabilidad de encontrarlo en uno u otro lugar de esa región. Dato éste que, como ya se vio el capítulo I, es indispensable para la descripción determinista de los sistemas físicos.

imprecisión que conlleva el tratamiento ondulatorio de la localización, se puede afirmar que la función de onda es capaz de prever la evolución de la trayectoria del paquete de ondas en el espacio y en el tiempo. Por esto, Schrödinger creyó haber salvado el determinismo de la física gracias a su ecuación, ya que esta función de onda contiene la información necesaria para prever la evolución de los microsistemas¹²⁷.

Sin embargo, esta evolución es predecible siempre y cuando no pretendamos observarla experimentalmente, a través de una medición, pues, entonces, se introducirá una “perturbación” en el sistema que modificará su evolución de la siguiente forma:

“... entre dos observaciones, la función de onda que describe el cuanton¹²⁸ obedece rigurosamente a la ecuación de Schrödinger. Pero en el momento de la observación esa ecuación deja bruscamente de ser válida y la función de onda se reduce a una de las posibilidades que ella describe. Una vez hecha la observación, la función de onda evoluciona a partir de ese «estado reducido» y obedece de nuevo a la ecuación de Schrödinger, lo cual en general hace que aparezcan nuevas posibilidades y esto ocurre hasta la siguiente observación del cuanton”¹²⁹.

Esto es lo que se llama *el colapso de la función de onda*, o también, *la reducción del vector de estado*, y significa que si queremos precisar el estado del sistema debemos realizar una medición, con lo cual reducimos todas las posibilidades a una sola, pero, al hacer esto, destruimos la función de onda y la ecuación de Schrödinger deja de ser válida. De esta forma, el “colapso de Ψ ” revela los dos aspectos conflictivos que la mecánica cuántica introdujo en el acto de medir: por un lado, cuando se produce este “colapso” y no podemos seguir utilizando los datos de la misma ecuación, la evolución del sistema queda indeterminada al igual que lo estaba su estado antes de la medición; por otro lado, el acto de observación y medida va a asumir una función protagonista, de la que carecía en las teorías clásicas.

¹²⁷ Puede prever la trayectoria, pero no su localización espacio-temporal, la cual sólo se puede averiguar a través de una observación.

¹²⁸ Los autores prefieren utilizar el término *cuanton*, sugerido por Mario Bunge, en lugar de partícula, para denominar los objetos cuánticos con el fin de evitar asociarlo a la idea de corpúsculo o punto material. Cf. ORTOLI, S./PHARABOD, P., El cántico de la cuántica, p. 41.

¹²⁹ *Ibid*, p. 48.

Antes del acto de medida la función de cada objeto cuántico expresa que dicho objeto está en un estado indeterminado, que se conoce con el nombre de *superposición de estados*¹³⁰, el cual contiene todas las posibles situaciones en las que se puede encontrar el sistema y las probabilidades de que el resultado de la medición sea éste o aquél. Por consiguiente, hacer una medición consiste en pasar de la superposición de varios estados a uno sólo, lo cual es reducir el paquete de ondas de la función Ψ . Ésta es la razón por la que se afirma que es el acto mismo de observar el que hace real una de estas potencialidades, que contiene la función de onda inicial antes de colapsar, y es sólo entonces cuando se concreta una sola de las posibilidades, obteniéndose una información precisa acerca de la propiedad del sistema que se está midiendo.

Pero, además, el otro aspecto del colapso nos revela que, teniendo en cuenta que sólo podemos atribuir una exacta localización espacial al sistema a través de una medición y que la observación que nos permite conocer aquélla es la que destruye la posibilidad de conocer cómo evolucionará el sistema, ambas informaciones se vuelven incompatibles por no poder ser conocidas simultáneamente acerca del mismo sistema. Pues, una vez que hemos conocido la localización del objeto, se produce la reducción del paquete de ondas, que conlleva la invalidez de la ecuación que utilizamos antes de la medición al modificar la evolución del sistema, con lo cual necesitamos otra ecuación, que expresa otra evolución diferente con su correspondiente superposición de estados.

Esta situación también aparece en el álgebra matricial de Heisenberg, la cual tiene el equivalente del *vector estado* en la *matriz densidad* y la no conmutatividad de sus operadores implica la imprecisión en la localización del sistema microfísico a la hora de obtener una descripción causal completa y bien definida del sistema.

Volviendo al otro aspecto del colapso de Ψ , que el problema de la medición cuántica saca a la luz, hemos de especificar que implica una *ineludible interacción observacional* en la descripción objetiva de la Física. Lo más extraño del colapso de Ψ es que sólo se da en la interacción entre el aparato de medida y el sistema bajo observación; es decir, que en las otras interacciones, no observacionales, que se dan en la Naturaleza, las funciones de onda que describen esos sistemas en interacción no se colapsan sino, que se funden entre sí para contener en una única función de onda global todas las posibilidades que representaban las dos funciones de onda iniciales de cada sistema:

¹³⁰ Cf. *Ibid*, pp. 69-72.

“Aquí no se trata de una reducción sino que se trata de una creciente complejidad. Y lo peor es que si el sistema global se separa de nuevo en dos subsistemas que se alejan el uno del otro, no se podría describir cada subsistema por una función de onda independiente, sino que siempre habrá una función de onda global para el conjunto de los dos; ésta es en verdad la propiedad verificada por la experiencia de Aspect. (...) ¿Por qué la función de onda global del conjunto habría de reducirse a una sola de las posibilidades que ella describe, siendo así que en toda otra interacción se llega a una función de onda global que contiene el conjunto de las posibilidades de cada uno de los sistemas que entraron en interacción?”¹³¹.

Por consiguiente, el colapso de Ψ no sólo acaba con la posibilidad de dar una descripción determinista, y clásicamente completa, de los sistemas atómicos, también plantea este extraño problema que sólo afecta a las interacciones llevadas a cabo en el acto de una medición cuántica: la función de onda se colapsa cuando el observador interfiere con la Naturaleza, para medir y precisar los valores de las magnitudes que se utilizan para describir el estado dinámico y cinemático de los sistemas físicos¹³². Con lo cual el papel del sujeto va a adquirir una importancia crucial en la descripción objetiva de los fenómenos, de la que carecía completamente en las teorías clásicas. La respuesta que la llamada “Interpretación Ortodoxa” o “Interpretación de la Escuela de Copenhague”¹³³ dará a este enigma es la siguiente:

“Según esta interpretación, *la física cuántica se refiere no a la realidad, sino al conocimiento que tenemos de la realidad*. Ese conocimiento está descrito por la función de onda y es normal que la función de onda esté perturbada (reducida) en ocasión de una medición, puesto que en ese caso precisamente modificamos nuestro conocimiento de la realidad.

¹³¹ Cf. *Ibid*, p. 77.

¹³² Desde el punto de vista equivalente del álgebra matricial de Heisenberg, se diría que cuando interferimos con el fenómeno a través de una medición, para dejar bien definido uno de los operadores no conmutativos, alteramos el estado de incertidumbre de todo el sistema a favor de la determinación de aquél y de la indeterminación de su par correspondiente canónicamente conjugado.

¹³³ Se llamará así a la escuela de pensamiento que iniciaron Bohr, Heisenberg y Born, en la que se juega básicamente con los elementos de incertidumbre, probabilidad, interacción observacional y complementariedad; sin embargo, sus ideas acabaron siendo una tergiversación de las ideas originales de sus iniciadores.

La física cuántica permite simplemente a los observadores que disponen de aparato de medición representar correctamente las observaciones”¹³⁴.

Más adelante desarrollaré que esta postura se basa en la tesis que defenderá Bohr acerca de la naturaleza de las propiedades físicas, ya que estas propiedades no le corresponden exclusivamente al objeto atómico, sino que son el resultado de la combinación entre el objeto observado y el instrumento de observación. Pero, antes de esto, en el próximo capítulo se podrá comprobar cómo “el problema de la medida” afecta a estas cuestiones, dos de las más acuciantes que la mecánica cuántica suscitó al ideal descriptivo de la física clásica: la renuncia a la absoluta predicibilidad causal y a la objetividad clásica¹³⁵. Allí, examinaré estos problemas en detalle y por separado, dado que, hasta ahora, me he centrado, únicamente, en la generalización de ambos con el objeto de aclarar las conexiones que mantienen entre sí, en tanto que los dos problemas se derivan del mismo hecho, la individualidad del postulado cuántico, y en tanto que ambos aparecen en los dos tipos de formalismo matemático que ofrece la física cuántica.

d) El “contenido intuitivo” del formalismo cuántico

Según declaraciones del propio Heisenberg, introdujo su principio de indeterminación para dotar de contenido físico a la mecánica cuántica. Sin embargo, antes de seguir avanzando en el análisis de las características de la física cuántica y en los problemas que se derivaron de ella, aclararé el significado y el uso que realizo del término “intuitivo” a lo largo de todo este trabajo.

Contenido físico, contenido intuitivo, significado físico, así como otros términos derivados de éstos, son, si no sinónimos, sí equivalentes. Todos ellos aluden a la *capacidad de la teoría de conectar con el mundo exterior*, la realidad física, y esta capacidad, se realice como se realice, se nos manifiesta a través de la posibilidad de *representación*, o *descripción física*, de los fenómenos por parte del lenguaje físico y de sus conceptos

¹³⁴ ORTOLI, S./PHARABOD, P., El cántico de la cuántica, p. 82.

¹³⁵ “En definitiva lo que está en juego es el *tipo de objetividad* que puede obtenerse de los objetos atómicos, y en último término, *la posibilidad de mantener el ideal descriptivo clásico* en cuanto explicación causal de los fenómenos en el espacio y en el tiempo”. RIOJA, A., “La filosofía de la complementariedad y la descripción objetiva de la naturaleza”, p. 262.

descriptivos, los cuales han de tener no sólo un significado en la teoría, sino también un significante extralingüístico o referente en la realidad.

Con este sentido fue como Heisenberg acuñó el término “contenido intuitivo” (“*anschaulichen Inhalt*”), que también fue utilizado tanto por Bohr como por Einstein, aunque en ninguno de estos tres autores se identifica con la forma de representación pictórica. Heisenberg lo introduce en el año 1927, cuando publica el artículo donde propone sus relaciones de incertidumbre, bajo el título “*Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik*”¹³⁶, que se tradujo al inglés como “*The Physical Content of Quantum Kinematics and Mechanics*”¹³⁷. En este epígrafe no me detendré en las relaciones de indeterminación, tema que dejo para otro momento, sino en el significado del término “contenido intuitivo”.

Con la introducción de la noción de “cuanto”, con su característica de discontinuidad, el movimiento como traslación continua se convierte en un problema porque no se puede seguir toda su trayectoria al no poder mantenerse la descripción espacio-temporal de un fenómeno físico. El fracaso de este tipo de descripción, en tanto que es necesaria para la representación del desplazamiento de un móvil sobre un marco espacial continuo, conlleva el problema de cómo interpretar los experimentos donde sí parece que se cumple tal situación, además de implicar una ruptura, dentro del ideal de descripción física, entre los términos matemáticos con los que trabaja la teoría y los términos lingüísticos, o conceptuales, que ofrecen a la física la posibilidad de representarnos el mundo de los fenómenos. Esta situación es la que A. Rioja pone de relieve en su artículo *Los orígenes del principio de indeterminación*:

“Parece pues que lo que está sobre la mesa es nada menos que la aplicabilidad de la matemática a la naturaleza, o también si se quiere, la interpretación física de un formalismo matemático, puesto que la física no se reduce a la matemática (...). Encontrar un modo de tender un puente entre teoría y experiencia consiste en establecer los términos adecuados con los que referirse a ella. O dicho con más precisión, *interpretar los experimentos es hallar el modo de correlacionar los símbolos del lenguaje matemático con los términos del lenguaje*

¹³⁶ HEISENBERG, W., “*Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik*”, *Zeitschrift für Physik*, 43, 172-98 (1927).

¹³⁷ HEISENBERG, W., “*The Physical Content of Quantum Kinematics and Mechanics*”. In: WHEELER, J.A./ZURECK, M.Z. (eds.), Quantum Theory and Measurement, University Press, Princeton, 1953, pp. 62-84.

ordinario, única forma que está a nuestro alcance de decir algo acerca de la naturaleza. Esta es la tesis que Heisenberg defendió (no sin que mediara la influencia de Bohr)...”¹³⁸.

En otras palabras, Heisenberg introduce el término “anschaulich” unido a “Inhalt” como aquello que permite *la conexión entre teoría y realidad*; éste es el significado atribuido por Heisenberg a dicho término, tal y como es propuesto por A. Rioja a lo largo del artículo que acabo de citar:

“Es en este sentido en el que *contenido intuitivo* es equivalente a *contenido físico* (...). Las relaciones de incertidumbre han dotado de contenido intuitivo a la teoría al permitir representarnos y expresar sus consecuencias experimentales mediante conceptos físicos (posición, momento, energía, tiempo, etc.), y no mediante conceptos meramente matemáticos (matrices, operadores hermíticos, vectores de estado, espacio de Hilbert, etc). Pero estos conceptos físicos no son sino los de la física clásica, que a su vez tienen su origen en la depuración del lenguaje ordinario formado a partir del contacto con el mundo empírico. Ello garantiza la necesaria conexión de la teoría con la experiencia. Ya no se trata de visualizar los fenómenos sino de hallar el lenguaje con que describirlos de manera objetiva. Las relaciones de incertidumbre proporcionan las condiciones de uso de esos lenguajes, sus posibilidades y sus límites”¹³⁹.

La acepción de “anschaulichen Inhalt”, que Heisenberg le concede en su famoso artículo, se extendió rápidamente entre los físicos que estudiaron la cuestión de cómo describir una situación experimental de los fenómenos cuánticos usando el formalismo matemático, esto es, el problema de la interpretación física de aquél, ya que ésta se ha vuelto, ciertamente, problemática en el ámbito cuántico de la microfísica.

Así pues, el término “intuitivo” puede caracterizarse como “sentido físico”, tal y como aparece en las publicaciones de habla inglesa, en la acepción que usó Heisenberg del adjetivo alemán “anschaulich”: dado que los conceptos descriptivos de la física clásica mantienen una conexión con la realidad a través de una depuración teórica de nuestras experiencias sensitivas, el “sentido físico” se define como aquello que permite tender un puente entre el mundo microscópico y el macrocosmos, entre el abstracto

¹³⁸ RIOJA, A., *Los orígenes del principio de indeterminación*, p. 121.

¹³⁹ *Ibid*, pp. 135-136.

formalismo de la física cuántica y el marco conceptual de la física clásica, entre el lenguaje cuantitativo de las matemáticas y el lenguaje cualitativo de nuestra experiencia ordinaria.

Por ello, Bohr recurre a las relaciones de indeterminación para defender el carácter intuitivo de la mecánica cuántica frente a la oposición de Einstein. Si bien, el objetivo de Bohr fue dotar de este carácter intuitivo a la teoría, lo hizo negando la objetividad clásica y el determinismo, pero es cierto, y de acuerdo con Selleri¹⁴⁰, que estos tres problemas están, fuertemente, relacionados. He aquí el porqué de ese “malabarismo” epistemológico que efectuará en su filosofía de la complementariedad.

Con todo esto y para no tener que hablar de “elementos objetivos”, como hará Einstein, ni de “categorías ontológicas”, a modo de intuición kantiana, lo cual queda fuera de la “doctrina del actor-espectador”, Heisenberg y Bohr alegan que el *contenido intuitivo* de una teoría se mide en función del *grado de comprensión y explicación* de la realidad física, que podemos obtener de ella. Por ello, dicen que una teoría es intuitiva cuando nos ayuda a comprender y explicarnos un poco mejor el mundo, pues, por un lado, *describe físicamente* el fenómeno, en cuya descripción se incluye la comprensión y la explicación de éste, además de su descripción matemática, y, por otro lado, nos sirve para comunicar esta información a los demás:

“De ahí que el término *intuición* deba ser redefinido, cosa que Heisenberg no hace explícitamente. Cassidy, sin embargo, tiene razón cuando sostiene que el sentido de *anschaulich* queda modificado, no haciendo ya referencia al carácter pictórico o visualizable, sino al significado físico o experimental. El haber logrado referir el formalismo cuántico a las operaciones de medida en un laboratorio es lo que permite interpretarlo intuitiva o perceptivamente. Dadas las limitaciones impuestas por el principio de indeterminación, la teoría no puede ser intuitiva en sentido clásico, pero sí puede tener significado físico, lo que supone que incluya conceptos (los conceptos clásicos) con los que poder caracterizar y comunicar los resultados experimentales”¹⁴¹.

¹⁴⁰ “Debería recalcar que esos problemas no están desconectados: de nada vale poner el énfasis en la realidad de los objetos atómicos si en principio no son comprensibles. Sin la comprensibilidad la realidad física se transforma en un fantasma en la penumbra, aislado para siempre de nosotros y misterioso; sin causalidad es imposible visualizar, de manera completa, la evolución de un proceso físico”. SELLERI, F., El debate de la teoría cuántica, p. 48.

¹⁴¹ RIOJA, A., *Los orígenes del principio de indeterminación*, p. 135.

Por esta razón es importante resaltar que la noción de “intuición”, que se está utilizando en este contexto, no hace referencia a la representación visual o pictórica; por ello pudieron usarla tanto Heisenberg y Bohr como Einstein. De esta forma, para Bohr, las nociones clásicas tienen contenido intuitivo porque son capaces de conectar las matemáticas de la teoría con el lenguaje cualitativo de nuestra experiencia ordinaria, con lo cual conseguimos, en primera instancia, *describir físicamente* el fenómeno, es decir, “interpretar” el resultado de nuestros experimentos, en segundo lugar, *comunicar* a los demás la información que hemos obtenido y, por último, *tender un puente* entre *el mundo microscópico* que estamos estudiando y *los dispositivos experimentales macroscópicos* que para ello empleamos y que están contruidos y definidos conforme a la terminología clásica, característica de la escala macrocósmica¹⁴². No se trata de una correlación directa de la teoría con la realidad física, sino indirecta y a través de la física clásica: el puente, que tenderá Bohr, es entre el formalismo cuántico y los conceptos descriptivos del marco clásico; es un puente, tal y como expondré en su momento, entre dos lenguajes, donde se supone que el segundo, el de la física clásica, ya contiene de por sí cierto valor intuitivo que lo conecta con el mundo exterior, que la teoría describe.

Más adelante analizaré que Bohr no puede construir un *puente directo* entre teoría y realidad porque ha suprimido el concepto de “realidad física independiente” como fundamento de la objetividad física. Él establecerá que las únicas condiciones de la objetividad son las condiciones intersubjetivas de un lenguaje inequívoco, *con contenido físico*, siendo la objetividad una propiedad de las descripciones y no de la realidad, a la que sólo accedemos por el uso inambiguo de los conceptos clásicos.

De modo que una de las condiciones para la comunicación inambigua es que los dispositivos experimentales sean descritos con los términos clásicos del lenguaje ordinario, el cual ofrece una interpretación de todos los fenómenos al establecer una relación entre las matemáticas y el mundo de la experiencia, el de nuestras percepciones. Dicha condición es satisfecha sólo dentro de los límites que establecen las relaciones de incertidumbre y del modo cómo sugiere el principio de correspondencia, ya

¹⁴² “En estas condiciones, hemos de comprender, de un lado, que el propósito de todo experimento físico, que es obtener información en condiciones reproducibles y comunicables, únicamente nos permite emplear conceptos de la vida diaria, refinados por la terminología de la física, cuando hemos de describir no sólo los instrumentos de medida y su funcionamiento, sino también los mismos resultados de las experiencias”. BOHR, N., Física atómica y conocimiento humano, p. 32.

que no se puede ignorar la inseparabilidad entre el objeto observado y el instrumento de medida que interacciona con él para hacer posible su observación. Sin embargo, le ha cerrado el camino a la conexión directa entre teoría y realidad, lo cual, implica el problema, que expuse anteriormente, de la representabilidad y de la descripción física. Pero, a partir de este punto crucial, se ha de justificar que exista algún otro camino.

Por su parte, Einstein, aun respetando este sentido de “*anschaulichen Inhalt*”, va más allá en la noción de contenido intuitivo de lo que hizo el propio Heisenberg. De momento sólo puedo dejar apuntada esta afirmación, que argumentaré en su momento, y la siguiente controversia: dicha noción fue introducida por Heisenberg para dotar de este contenido a una teoría indeterminista y garantizar así su conexión con la realidad, sin embargo, Einstein no considera “intuitiva” a la física cuántica por ser, precisamente, una teoría indeterminista.

Por último, otra aclaración más. A veces, en algunos de sus artículos, se encuentra la siguiente afirmación de Bohr: el carácter *no-intuitivo* del formalismo se corresponde con la *descripción estadística* que nos revela su interpretación física; pero, en estos textos, utiliza la expresión “no-intuitivo” en sentido clásico, es decir, que no existe una correspondencia directa de la teoría con la realidad a través de la representación pictórica: la verdad ya no es aristotélica, no se entiende como “*correlatio rei*”.

La correlación ahora se ofrece de una manera indirecta y simbólica, a través de una aproximación asintótica con los conceptos clásicos (construidos sobre la base de la continuidad y de la objetividad clásica); situación que se nos revela en el nivel teórico por el carácter estadístico de sus leyes. Es decir el esquema matemático de la teoría no es intuitivo; pero la mecánica cuántica sí lo es gracias a la posibilidad de interpretar tal formalismo.

Es dentro de este contexto como yo utilizo el término “intuitivo” al referirme al uso que hacen de él, además de Heisenberg, tanto Einstein como Bohr. Aunque, si bien emplean este término, “contenido intuitivo” en el mismo sentido, propondrán distintos criterios, requisitos o exigencias para asignar este término a una teoría física; cuestión en la que entraré en otros capítulos.

e) Conclusión. La naturaleza y el carácter realista del cuanto universal de acción

A lo largo de este capítulo se ha comprobado cómo se impuso el valor del cuanto de acción a través de la experiencia: el respaldo de ésta fue haciéndose cada vez más fuerte, a medida que se encontraban nuevos fenómenos que sólo se explicaban desde la idea de la teoría cuántica, y que iban encajando coherentemente en ella, como las piezas de un inesperado rompecabezas.

Por esta razón, aunque sin entrar en cuestiones de interpretación del formalismo, sólo me he centrado en describir dichas circunstancias experimentales (problemas empíricos, fenómenos descubiertos, observados y explicados por la teoría cuántica) y el contexto teórico con el que se explicaron aquellas relaciones empíricas. La interpretación vendrá después, ya que casi ningún físico admitía la realidad de la constante de Planck; sólo la naturaleza era quien insistía en su presencia física. A través del desarrollo que he realizado sobre el origen y la formación del, posteriormente, llamado *postulado cuántico*, puede verse el poder explicativo que esta *idea* posee en sí misma, imponiéndose a las ideas clásicas. El motivo de este enorme poder, con el que venció a las teorías clásicas y a los propios científicos, reside en su inmaculado acoplamiento con la experiencia¹⁴³, el cual se compone de las siguientes etapas.

Primera etapa: aparición de la idea de “cuanto” (Planck, 1900). El cuanto es el “átomo de energía”, que implica un modelo de discontinuidad para la radiación, que ya disponía de un modelo ondulatorio, que implica continuidad, al que tampoco se pudo renunciar. Cinco años después vino la teoría fotónica de Einstein y en 1916 y 1923 el planteamiento de Einstein es demostrado experimentalmente por Millikan y Compton, respectivamente. Durante esta primera etapa se descubrió que el atomismo y la discontinuidad también debían abarcar a la radiación y no sólo a la materia.

Etapas intermedia: la teoría atómica de Bohr (1913). Bohr conectó el concepto de cuanto de energía con el modelo atómico de Rutherford. Esta teoría sirvió para explicar la estructura atómica de cada elemento, la cual se nos revela en las series de líneas espectrales que caracterizan a cada elemento. También explicó la estabilidad del átomo, de la materia, que en el modelo de Rutherford se planteaba como un problema. Además, abrió la

¹⁴³ La polémica acerca de si es la experiencia la que se ajusta a las ideas de la razón, por medio de los modelos matemáticos de la teoría, o si ocurre lo contrario, queda fuera del alcance de este trabajo. Lo que sí parece claro es que, si se quiere entender la realidad física, la Naturaleza, ambos elementos se han de relacionar de algún modo llegando siempre a un acuerdo entre los dos, antes que a una imposición de una de las dos partes sobre la otra.

puerta a la moderna alquimia: la transmutación de los elementos químicos. Su poder explicativo en el campo de la espectroscopia fue un gran éxito, pero “puso en peligro la consistencia de la física” porque no explicaba los fenómenos de interferencia y difracción de la luz que tan bien eran descritos por la teoría ondulatoria. De modo que, cuando el átomo ya no sólo era el modelo explicativo de la materia, sino que, sobre todo, se convirtió en el objetivo explicativo directo, en el objeto mismo de la explicación, surgió el doble modelo explicativo para la materia y la radiación.

Segunda etapa: la dualidad de de Broglie (1924). De Broglie afirmó que la radiación estaba formada de ondas y de partículas, al igual que la materia, ya que los electrones del modelo cuántico de Bohr se explican mejor si poseen ondas. En el próximo capítulo se expondrán las soluciones que fueron propuestas para resolver la dualidad: de Broglie concedía existencia material, real, tanto a las ondas como a los corpúsculos, de lo que resultó su modelo de la “onda-piloto”, donde las ondas guiaban a la partícula y controlaban su movimiento.

Schrödinger pensaba que había sólo ondas que, en ocasiones, se comportaban de un modo muy parecido a los corpúsculos. Para Born, en cambio, las partículas eran las entidades elementales y las ondas sólo eran indicadores de la probabilidad con la que se rige el comportamiento de las partículas; las ondas no son objetos materiales, sino magnitudes o entes matemáticos, cuya estructura, meramente matemática, se refleja en forma de ondas.

Pero, de momento, dejaré todo esto para tal ocasión, junto con el problema de la trayectoria, el principio de indeterminación, la sustitución de las leyes causales por leyes de probabilidad y la complementariedad. Sólo apuntaré que, por un lado, Schrödinger se basó en las ideas de de Broglie para construir su mecánica ondulatoria en 1926, mientras que Heisenberg había construido la suya en 1925, basándose en el principio de correspondencia de Bohr. Por otro lado, en 1927, Bohr presentó su ponencia epistemológica en Como acerca de un nuevo marco descriptivo para la física, el de la complementariedad y algunos meses más tarde, durante el V Congreso Solvay, se inició la polémica Einstein-Bohr. Además, para Bohr, el modelo ondulatorio tiene *tanta o tan poca* realidad como el modelo de corpúsculo, es decir, el carácter dual de la naturaleza sólo implica la insuficiencia de estos modelos a la hora de explicarla; no podemos tener, o formarnos, imágenes visuales, imágenes mentales espacio-temporales, las cuales conforman un modelo u otro porque la naturaleza no se ajusta exactamente a estos modelos. Sin embargo, ya se

verá que su renuncia no es absoluta, él buscará salvar “algo” de tal descripción espacio-temporal para no perder, precisamente, el contenido intuitivo o físico de la teoría; con este objetivo también nació el principio de indeterminación.

Tercera etapa: la construcción del formalismo matemático. La constante de Planck también hizo acto de presencia en la mecánica de matrices y en la mecánica ondulatoria; además de ser la reguladora de la precisión con la que pueden medirse las magnitudes dinámicas y cinemáticas en el principio de indeterminación.

Por consiguiente, la presencia de h en las primeras fórmulas cuánticas queda como sigue: en la ley de distribución de Planck implica que la radiación, cuando interactúa con la materia, se emite y se absorbe de manera discontinua; en la teoría fotónica de Einstein, que la radiación no sólo se emite y se absorbe a través de cuantos, sino que también se traslada en el vacío en forma discontinua; en la teoría atómica de Bohr implica que la estabilidad de la materia se la debemos a h , esto es, a que las órbitas de los electrones están cuantizadas (los cambios de órbita se realizan de forma discontinua); en la teoría de de Broglie implica que la materia también es ondulatoria y que estas ondas de materia están regidas por h , lo cual explica los números enteros de la condición cuántica de Bohr para las órbitas electrónicas y la discontinuidad del espectro electromagnéticos de la lista de los elementos químicos.

Por otro lado, además de estar en el origen de la dualidad, de Broglie defiende que también h es la responsable de los tres problemas epistemológicos fundamentales, en los que se profundizará en el próximo capítulo: el fracaso de la descripción espacio-temporal, el problema de la objetividad en tanto que implica interacción observación en el momento de la medición y el problema del determinismo, ya que su significado física implica, sobre todo, una vinculación interna de las magnitudes dinámicas y cinemáticas. Ahora bien, que h sea la responsable de todo esto significa que es la esencia de la física cuántica, de modo que si se busca una teoría que la sustituya se ha de eliminar su valor como constante universal¹⁴⁴.

Así, puede verse que las soluciones a los primeros problemas que surgieron provocaron, a su vez, otros problemas nuevos, y que tal concatenación de problemas y soluciones trajeron el problema del

¹⁴⁴ Einstein dedicó los últimos treinta años de su vida a buscar una teoría así, guiado por su idea de una teoría del campo único basado en la noción de continuidad, y fue Bohr quien le convenció de que, para elaborar una teoría distinta de la física cuántica, debía olvidarse de h .

realismo, el cual comparte el mismo origen que los anteriores: la introducción de la noción de cuanto. Por ello, recordaré que esta situación puede entenderse mejor si se estructura en tres fases.

La primera es la *aparición del cuanto de acción*: éste resolvió el problema de la “catástrofe ultravioleta” y otros fenómenos sin explicación desde la física clásica, pero introdujo la discontinuidad en el modelo de radiación y tuvo que romper con el modelo clásico de ésta que sí explicaba otros fenómenos irrenunciables. La segunda es el *surgimiento de la dualidad*: con la dualidad se resolvió el problema de la incoherencia en la física, pues se consiguió una explicación de todos los fenómenos, incluidos los clásicos, pero forzó a los físicos a admitir un doble modelo descriptivo, incompatible y ambiguo, tanto para el comportamiento de la materia como para el de la radiación. La tercera fase se caracteriza por la *introducción del fenomenismo en la descripción física inequívoca*: con ello se resolvió el problema de la ambigüedad de tener un doble modelo explicativo, pero su solución para la descripción física inambigua, esto es, el marco de la complementariedad de Bohr, implicó el sacrificio del realismo clásico, al renunciar a la capacidad de representación pictórica de la descripción espacio-temporal, esto es a la “física imaginativa”.

De tal modo puede verse tras un análisis retrospectivo de la situación, que es el cuanto de acción el principal responsable del problema del realismo. Éste es el motivo que justifica la necesidad de reflexionar sobre su naturaleza, empírica o racionalista, y su carácter o valor epistemológico realista.

Los cuantos, una vez descubiertos, se rebelaron contra el carácter hipotético que le fue atribuido por sus descubridores, imponiéndose con tal fuerza que terminó venciendo los escrúpulos de aquéllos. Esta fuerza, con la que surgió el cuanto de acción, reside en que se trata de un hecho elemental de naturaleza empírica, pero con carácter universal: si bien no hay ninguna *necesidad* de que la realidad física sea como es, para que nuestro universo actual sea como es de hecho requiere que se den las condiciones cuánticas, que la propia Naturaleza se impone a sí misma, y que se manifiestan al conocimiento que el científico tiene de ella. Así es como lo expresa Papp:

“Visto que todos los fenómenos del mundo físico no son más que intercambios energéticos, este trozo privilegiado de acción, el cuanto elemental h , se esconde como último elemento en todos los acontecimientos del Universo. Sin el cuanto no habría ni luz ni materia,

el cosmos sería distinto a lo que es. Esta universalidad es la que da su inmenso alcance a la constante de Planck”¹⁴⁵.

En relación con esto, hay muchos autores que afirman que el origen de h fue empírico, al igual que su naturaleza; pero no lo fue, al menos en un sentido estricto. La férrea oposición de los físicos ante la noción de cuanto demuestra, ciertamente, que no brotó de ningún presupuesto racional, no tenía el apoyo de la predisposición o expectativas de los físicos, también es cierto que apareció ella sola de manera incoherente con la teoría del momento, careciendo de todo *cuero teórico* propio; éste vino más tarde. Se trataba, además, de una noción totalmente contraria y ajena a las teorías clásicas de la época, la cual desencajaba en todos los ideales descriptivos de esta física. En estos aspectos admito que tiene un carácter empírico.

No obstante, éstos no han de oscurecer el panorama en el que apareció h . Si Planck pudo plantearla como una simple hipótesis de trabajo, y, en tanto que esta hipótesis sólo aparece en la fórmula demostrada teóricamente desde la teoría de Boltzmann y no en la primera ecuación¹⁴⁶, entonces, me parece muy difícil negar que dicha hipótesis cuántica sea una *idea teórica*, que, además, poseía la fuerza de adaptarse a todas las experiencias, las cuales se mostraban inexplicables si se negaba la realidad de la discontinuidad de las acciones de la Naturaleza.

De tal forma, puede comprobarse que su origen no es estrictamente teórico, ya que en su primera aparición no provenía de ninguna teoría firmemente construida y bien asentada en la experiencia¹⁴⁷, pero tampoco es estrictamente empírico, pues posee algo así como un cierto rasgo de *idealidad intuitiva*¹⁴⁸. Ahora bien, si nos referimos a la historia de cómo esta idea se impuso a los científicos, esto sí lo realizó de manera empírica: a través de la experiencia fue como alcanzó la categoría de realidad física, pues los nuevos fenómenos sólo tenían explicación a través de ella¹⁴⁹.

¹⁴⁵ PAPP, D., La doble faz del mundo físico, pp. 65-66.

¹⁴⁶ La cual sí tenía un origen empírico.

¹⁴⁷ La situación fue la contraria: primero se dio con la fórmula empírica, después se buscó la teoría desde la que se pudiera deducir y, en este proceso de búsqueda teórica, fue cuando h adquirió todo su sentido. Cf. GRIBBIN, J., En busca del gato de Schrödinger, p. 33.

¹⁴⁸ Uso aquí el término “intuitivo” en su acepción general como sinónimo de percepción íntima espontánea e instantánea, sin que medie razonamiento alguno, y no en el sentido físico que impera en este trabajo.

¹⁴⁹ Por este motivo, se le demonina, por un lado, *postulado* y, por otro, *empírico*, ya que el primer término designa un carácter teórico e hipotético, y el segundo que es un hecho

El recorrido trazado en este capítulo, a través del desarrollo del postulado cuántico, muestra que el carácter de discontinuidad de la Naturaleza apareció de forma abrupta y sorprendente, y no como el principio de continuidad que subyacía apaciblemente bajo el edificio conceptual de la física clásica. La hipótesis cuántica se estableció experimentalmente como un principio básico sin explicación teórica. Así se le consideró “irracional” porque ninguna teoría clásica daba “razón” de él. Por ello fue rechazada, incluso por su descubridor, quien la instauró en el ámbito de las hipótesis matemáticas, caracterizadas por ser meros instrumentos de cálculo sin correlato en la realidad.

La insistencia con la cual la experiencia se pronunció una y otra vez a favor de la hipótesis cuántica como un hecho fundamental, inclina a pensar que fue la propia Naturaleza quien estableció sus condiciones. El cuanto de acción aparecía una y otra vez en todos los fenómenos de intercambio de energía y, según se iban abriendo los nuevos campos de experiencia de la microfísica, la insospechada h se impuso con tal autoridad que nada ni nadie fue capaz de anular, a pesar de que los físicos no escatimaron esfuerzos para ello.

“Físicos ingleses y franceses hicieron los mayores esfuerzos para dominar el problema sin recurrir al cuanto. Con la misma probabilidad de éxito se habría podido ensayar, resolver la cuadratura del círculo. Es verdad que no había ninguna prueba de la existencia del cuanto, pero vivía la prueba irrefutable de la imprescindible de la hipótesis de Planck. Jeans y Poincaré demostraron que si el movimiento de las partículas materiales en las fuentes radiantes se realizara conforme a las leyes clásicas, sería imposible encontrar la ley exacta de la radiación negra, la de la curva de Lummer y Pringsheim. Hubo de admitirse que la antigua mecánica -la preciosa y sagrada mecánica de dos siglos- no podía dar razón de los movimientos en la escala atómica y, por

elemental de la Naturaleza. El primero indica que fue una idea surgida de la mente de un científico, que fue propuesta sin demostración alguna, de estas ideas surgen muchas, pero no todas tienen la corroboración de la experiencia, tal y como indica el segundo término: su demostración experimental; y muy pocas la gran insistencia de ésta en contra de los teóricos y a favor de su validez y de su sentido físico, y no meramente heurístico. En este capítulo he empleado el término “sentido físico” (o “significado físico”) por contraposición a un “sentido heurístico”: instrumentalista, usado como mera *hipótesis de trabajo*; de modo que si tiene sentido físico, tiene categoría de realidad física y, por ello, una correspondencia en el mundo físico externo a la teoría.

añadida, también la modificación relativista de los principios clásicos se reveló esta vez impotente”¹⁵⁰.

En conclusión, el significado físico de h , su naturaleza y su carácter realista ponen de relieve que no es posible seguir ignorando las condiciones teórico-matemáticas y epistemológicas que eludía la física clásica y que la Naturaleza pone de manifiesto en sus relaciones más profundas entre la materia y la energía radiante. Así pues, el nuevo marco conceptual debe partir de estas condiciones, las cuales serán analizadas próximamente junto con los problemas que suscitaron.

¹⁵⁰ PAPP, D., La doble faz del mundo físico, p. 61.

CAPÍTULO III:

«EL CONFLICTO CON LA FÍSICA CLÁSICA»

El tema de este capítulo será el conflicto que la repercusión física y epistemológica de la aparición de h proyectó sobre el marco clásico y que conmocionó al mundo de la ciencia. Tal conmoción se produjo en tanto que provocó el nacimiento de una nueva teoría y exigió un nuevo modo de comprender y relacionar los conceptos que operan en ella, abriendo el camino a un nuevo marco conceptual.

A continuación se podrá comprobar cómo la presencia de la *ley de los cuantos* en los formalismos de la física cuántica supone un afianzamiento mayor de los problemas epistemológicos que fueron apuntados en el segundo capítulo. Pero antes de entrar en las ideas capitales de Bohr, analizaré los elementos más básicos de sus reflexiones durante los años anteriores a 1927, los cuales le condujeron hasta su filosofía de la complementariedad: el nuevo marco conceptual de la física.

3.1) Los Problemas Epistemológicos del Formalismo Cuántico

Una vez resuelta la tarea de construcción de un formalismo matemático, se iniciaron las discusiones acerca del tipo de información que este formalismo ofrece sobre lo que ocurre en el interior de los átomos. Una información que, a medida que fue profundizándose en ella, se fue revelando como algo que se alejaba cada vez más del tipo de descripción de la física clásica.

Mostraré cómo la ecuación de Schrödinger era perfectamente operativa, porque resolvía todos los problemas físicos con exactitud y sencillez; pero contenía los tres problemas epistemológicos fundamentales de la nueva física.

Por un lado, el *problema general de la medida*, como aquél que afecta al ideal determinista y a la objetividad clásica. Aunque la forma de la ecuación es determinista, debido a que contiene ecuaciones diferenciales, no restaura el determinismo, perdido por la aparición del postulado cuántico: el significado del cuanto elemental de acción implica una

dependencia ineludible entre las propiedades geométricas y dinámicas, con lo cual no se podrá mantener el ideal clásico de descripción completa que da cuenta de ambas magnitudes simultáneamente, pues al medir una se altera el valor de la otra¹. La razón de esto es la siguiente: al aplicar la ecuación al sistema que se tiene bajo observación, se produce el llamado *colapso de la función de onda* o *reducción del vector de estado*, con su consiguiente renuncia a la objetividad clásica² y al determinismo físico. En tal situación se dan los mismos problemas que manifiesta el álgebra no-conmutativa del formalismo matricial.

Por otro lado, tampoco se resolvió el *problema de la dualidad* ni con la renuncia de Heisenberg a usar los conceptos clásicos ni con el intento de Schrödinger de solucionarlo en favor de las ondas, pues no consiguió explicar las características cuánticas de los objetos atómicos en términos únicamente ondulatorios y reduciendo a éstos los rasgos corpusculares. Puesto que no se supo decir en qué consistían sus ondas de materia, a pesar de las dos hipótesis que Schrödinger elaboró para responder a esta pregunta acerca de “qué es ese misterioso *algo* que ondula en la materia”.

Por último, tal fracaso fue también lo que originó el *problema del representacionismo pictórico*, ya que obligó a los físicos a renunciar a las imágenes pictóricas y, con ellas, tanto a la descripción física de la realidad como a *ideal cartesiano* de representación ostensiva de los objetos y del mundo físico, en el espacio y tiempo ordinarios (figura y movimiento), como a aquella otra, que llamé “*ideal maxwelliano*” de descripción, que si bien no necesita figuras en la representación del campo, sí que necesita definirlo a partir de una estructura espacial.

a) La repercusión de la presencia de h en los formalismos de la mecánica cuántica

¹ Cf. DE BROGLIE, L., *Física y Microfísica*, p. 135.

² Si el *postulado cuántico* estipula que los cambios de estado en el interior de los átomos se realiza de manera discontinua, entonces: “Toda interacción o intercambio energético ha de tener valores que correspondan a la cantidad mínima de energía exigida por el cuanto de acción o múltiplo enteros de tal cantidad. Pero justamente, lo que permitía hablar del comportamiento autónomo de los objetos en el espacio y en el tiempo, ignorando por completo las condiciones de observación, era la posibilidad de reducir la interacción entre los objetos y los aparatos de medida hasta el infinito”. RIOJA, A., “La filosofía de la complementariedad y la descripción objetiva de la naturaleza”, p. 262.

Los dos formalismos, la mecánica matricial y la mecánica ondulatoria, contenían la consistencia lógica y el acuerdo con los resultados experimentales, que se han de exigir a una teoría. Cuando se demostró que ambos eran equivalentes³, el proceso de construcción de una nueva física se dio por terminado. Así, en el año 1926 ya se tenía una teoría consistente, con una formalización matemática que daba cuenta de todos los problemas físicos relacionados con los fenómenos experimentales, sin caer en las ambigüedades de la vieja teoría cuántica. Aquélla donde Bohr tuvo que recurrir a la física clásica, a través del principio de correspondencia, para resolver problemas a los que no se les encontraba solución desde su teoría. Gracias a esto se pudieron abandonar las “viejas recetas cuánticas”: reglas de cuantización y de selección, saltos de electrones entre órbitas y principio de correspondencia, que se utilizaban casi como instrumentos heurísticos carentes de un sentido físico preciso, y se *admitió la realidad de las expresiones matemáticas de la nueva mecánica como una nueva descripción de la Naturaleza*⁴.

Tanto la mecánica de matrices como la mecánica ondulatoria se construyeron con la esperanza de disolver los problemas conceptuales, que empezaban a vislumbrarse, a través de una teoría precisa que abarcara la explicación de todos los nuevos fenómenos en un solo cuerpo. Sin embargo, una vez conseguido esto último, ningún de los dos formalismos fue capaz de resolver los primeros; se necesitaba encontrar una interpretación física coherente con los hechos experimentales y con las matemáticas que se utilizaban para describirlos⁵.

Con lo cual la aceptación de las nuevas ideas trajo una nueva etapa de discusiones epistemológicas acerca del tipo de conocimiento al que se enfrentan los físicos de nuestro siglo. Pues, si bien, todas las cuestiones físicas relativas a la expresión matemática de la teoría quedaron resueltas,

³ Esta equivalencia de ambos formalismos fue demostrada matemáticamente por Dirac, Carl Eckart y por el mismo Schrödinger. Razón por la cual, las ecuaciones de la mecánica ondulatoria contienen expresiones equivalentes a la relación de no conmutabilidad e, incluso, el factor \hbar/i , presentes en la mecánica matricial de Heisenberg. Cf. GRIBBIN, J., En busca del gato de Schrödinger, pp. 96-97.

⁴ Véase apéndice III, “El formalismo cuántico”.

⁵ “The situation of quantum theory in the summer of 1926 can be characterized by two statements. The mathematical equivalence of matrix mechanics and wave mechanics had been demonstrated by Schrödinger, the consistency of the mathematical scheme could scarcely be doubted; but the physical interpretation of this formalism was still quite controversial”. HEISENBERG, W., “Remarks on the Origin of the Relations of Uncertainty”, p. 3.

las dificultades conceptuales, con las que ya nació la idea de “cuantización”, se agravaron al instalarse, por un lado, en el seno del formalismo de Schrödinger⁶ y por otro, en el formalismo abstracto de Heisenberg, en el que esta misma situación le obliga a renunciar a las imágenes, rompiéndose el “puente”, la conexión clásica, entre la descripción matemática de la teoría y la descripción conceptual de la experiencia. Grave problema éste, ya que de tal descripción no podemos prescindir si queremos mantener el sentido de la física, que es comprender (y explicar) el comportamiento y la naturaleza de los fenómenos que tienen lugar en el ámbito natural⁷. Como así lo atestiguan las siguientes palabras de Honner:

“Estas dos formulaciones de la nueva teoría cuántica ocasionaron así una reconsideración de la situación de las nociones de onda y partícula como también del problema de las relaciones entre descripción teórica y realidad observada. ¿Son onda y partícula simplemente términos descriptivos? ¿Se ha distanciado la propia física de la realidad? Bohr estaba luchando con las mismas viejas cuestiones, pero ahora en un nuevo clima de pensamiento”⁸.

Dado que se buscó lo mismo por caminos diferentes, era de esperar que se encontraran dos teorías, pero lo que no se pudo sospechar es que ambas resultaran ser equivalentes. Debido a esto, los intentos de disolver la dualidad onda-partícula en favor de uno de los dos términos fracasaron de nuevo al comprender que el lenguaje ondulatorio de Schrödinger tenía su traducción cuántica en el lenguaje matricial de Heisenberg, para resolver los mismos problemas, a pesar de que éste no partió de la controvertida dualidad, sino directamente de los postulados cuánticos de Bohr; pero es que éstos ya llevaban en su base central el problema de la dualidad, inscrito en el carácter cuántico de sus fórmulas asignado por la constante de Planck. Aquella era la auténtica responsable del aspecto dual de los fenómenos naturales.

⁶ La mecánica ondulatoria no pudo eliminar la noción de cuantos discretos ni la de saltos de órbita, a la hora de dar una explicación del fenómeno de radiación del cuerpo negro. La equivalencia matemática de ambos formalismos implicaba que la onda (tridimensional) de Schrödinger también estaba sujeta al proceso de cuantización. Cf. GRIBBIN, J., En busca del gato de Schrödinger, p. 99.

⁷ Esto mismo es aquello que, en el primer capítulo, llamé “el ideal de la ciencia moderna”.

⁸ HONNER, J., The description of the nature, p. 42.

Una vez reconocida, su naturaleza híbrida obliga a aceptar el doble carácter que lleva implícito, ya que es ella quien liga las magnitudes corpusculares a las ondulatorias: es el resultado de la unión del cuanto de energía, cantidad discontinua, a la frecuencia, que siempre es la frecuencia de una onda, pues es la expresión de una periodicidad. De modo que todos los intentos por reducir la realidad a uno de los dos aspectos no sólo serán infructuosos, sino también incongruentes en tanto se mantenga la presencia de h en las ecuaciones del formalismo teórico de esta física.

Por esta razón, el formalismo matemático de la física cuántica no disuelve el problema de la dualidad, simplemente lo aparta de su camino, pues, aunque subyace en él, no introduce ninguna incoherencia lógico-matemática en su seno⁹. Esto le permite rechazarlo en tanto problema matemático de la teoría y, así, relegarlo al ámbito de la epistemología, con el objetivo de que se resuelva en el nivel conceptual del marco de la nueva física.

Así pues, el postulado cuántico, es decir, la discontinuidad esencial de la Naturaleza en sus intercambios energéticos con la materia, aparece con la introducción de la constante de Planck, la cual es la responsable de la dualidad onda-partícula y con ella del fracaso de la descripción espacio-temporal como representación pictórica a través de un modelo unívoco de la realidad.

Pero, también, es la causa del problema de la objetividad científica, en tanto que no sólo es una magnitud híbrida de características ondulatorias y corpusculares, sino que, además, el carácter discontinuo de h estipula una cantidad mínima, y con ella un límite a las posibilidades de reducir la perturbación observacional, impidiendo llevar a cabo tanto el ideal clásico de descripción objetiva como el ideal determinista.

La razón por la cual estos problemas conceptuales, a los que acabo de referirme, subyacen en las formulaciones matemáticas de la física cuántica es que ninguno de sus formalismos redujo el valor del cuanto de acción, haciendo de él una magnitud continua y eliminando su cualidad de ser una constante física; todo lo contrario, h sigue presente en la ecuación de Schrödinger y en las matrices de Heisenberg. Por tanto, las implicaciones epistemológicas de aquella son arrastradas por el nuevo formalismo cuántico al mismo tiempo que son relegadas, también por él, al ámbito de su “interpretación física” como cuestiones de epistemología y no de física, dado que los problemas matemáticos y experimentales fueron resueltos.

⁹ Me remito, de nuevo, al apéndice III.

No obstante, el problema del doble modelo conceptual no desapareció; sólo quedó oculto en la complejidad del elevado nivel matemático de las nuevas formulaciones teóricas. Al igual que un depredador se vuelve más peligroso cuando acecha entre las sombras que cuando ataca en campo abierto, la física cuántica corre el riesgo de no ser entendida si desviamos nuestra atención de este hecho: los formalismos cuánticos no disuelven la dualidad; sólo la apartan de su camino, haciendo de ella un fantasma en la penumbra. Pues, la forma como el cuanto de acción introdujo este tipo de discontinuidad esencial en las primeras fórmulas de la teoría cuántica se conserva exactamente igual en los formalismos teóricos de Schrödinger y de Heisenberg.

Es decir, la discontinuidad de la física cuántica se caracteriza por establecer un vínculo indisoluble entre las magnitudes cinemáticas y dinámicas pero, también, por crear otro entre las propiedades corpusculares y ondulatorias; tanto las “viejas” fórmulas como los “nuevos” formalismos tienen las mismas implicaciones, sólo que en éstos el segundo vínculo quedó diluido al reducirlo a una cuestión extrafísica (acerca del “contenido intuitivo” de las teorías) y, por ello, su papel en el conflicto ha sido, generalmente, devaluado. A pesar de ello, es el más importante porque es capaz de explicarnos el primero, además de ser él mismo quien ha de responder, en última instancia, ante el realismo, dado que Bohr hará caer sobre él esta responsabilidad a través de su solución al problema del contenido intuitivo¹⁰. A continuación demostraré cómo aquellos dos vínculos están relacionados, siendo la constante de Planck la responsable última de todo el “misterio” de esta física.

Con las primeras fórmulas de la teoría cuántica se resolvieron los problemas físicos de la radiación del cuerpo negro, el efecto fotoeléctrico, la estabilidad del átomo y sus consiguientes cuestiones acerca de la cuantización de las órbitas por números enteros; pero, las soluciones que se encontraron introdujeron la necesidad del doble modelo explicativo. Esta

¹⁰ Tanto Einstein como Bohr se dieron cuenta de la importancia de este problema de la dualidad y buscaron sus propias soluciones. En el próximo capítulo se verá que la propuesta filosófica de Bohr resuelve el problema de la objetividad y el determinismo, pero deja abierto el problema del realismo cuando ofrece su solución al dilema de la dualidad, y con ella al problema del contenido intuitivo, haciendo concesiones al fenomenismo, del cual sólo puede salir postulando el *significado simbólico* y el *uso analógico* de los conceptos descriptivos de la física clásica, como son los de “onda” y “corpúsculo”. Más adelante, en el quinto capítulo, expondré la alternativa que propuso Einstein.

dualidad no desaparece en los formalismos cuánticos¹¹, a nivel conceptual o epistemológico de su interpretación, y exige una solución.

El primer paso hacia la disolución de este problema es ver cómo la discontinuidad de h explica este paradójico comportamiento de los objetos microfísicos, aunque esta “explicación” no es una respuesta a los problemas epistemológicos, que vengo trazando hasta ahora; únicamente, los plantea de una manera más clara. Para ello, acudiré, de nuevo, al “experimento de la doble rendija”.

Si se usa el principio de Heisenberg para explicar los resultados de este experimento, nos encontramos con la siguiente consecuencia: cuando construimos un aparato que capta a través de qué agujero ha pasado el electrón, es un aparato preparado para medir la posición, con lo cual, esta medición va a alterar el movimiento del electrón, en términos de su impulso o cantidad de movimiento, de una forma tal que destruimos el modelo de interferencias y viceversa. Esto es el principio de indeterminación: si medimos q (posición) con toda exactitud, desconoceremos absolutamente p (su impulso o cantidad de movimiento).

A las consideraciones, que expone Feynman, se podría añadir esta otra: si el mecanismo fuera de no-interferencias se trataría de un contador Geiger, o simplemente un instrumento con un solo agujero; en este caso la cuestión no sería predecir por cuál pasaría (eso ya se sabría, ya que sólo habría un agujero o el contador sin más), pero querríamos poder predecir en qué momento del tiempo pasa. Se volvería a la misma situación, esta vez con la indeterminación del tiempo y la energía. Para conocer la energía cinética del electrón se necesitaría otro experimento que perturbaría la trayectoria que el electrón estaba efectuando hasta ese momento: sólo podríamos saber en qué momento pasa por el agujero o contador, esto es, el instante t_1 , si lo observamos en ese momento, ya que si lo observamos antes de t_1 , pongamos en t_0 , para medir su energía cinética y establecer los cálculos, modificaríamos el valor de dicha energía cinética en la trayectoria futura, lo cual haría impredecible el t_1 ¹².

¹¹ Ya que he insistido en que este problema no es intrínseco al formalismo matemático, es necesario aclarar que no desaparece si no separamos al formalismo de su interpretación; si los desvinculamos, sí, desde luego, pero esta actitud no fue tomada por casi ningún físico (excepto algunos físicos matemáticos como Arnold Sommerfeld).

¹² Esta situación se muestra también en el colapso de Ψ en la ecuación de Schrödinger: esta ecuación sólo contiene probabilidades y es equivalente al principio de Heisenberg porque la función de onda que contiene la información sobre la posición y la cantidad de movimiento, por ejemplo, se colapsa en medio de la medición, creando una nueva función con los valores exactos indeterminados: cuando una de las posibilidades, correspondientes

Por tanto, se llega a la primera implicación de Feynmann: jamás podremos averiguar por qué agujero pasó si no lo estamos mirando (observando, midiendo). Es decir, la descripción causal está limitada por este principio de Heisenberg, no existe la absoluta predictibilidad causal, debido a este comportamiento de las partículas: cuando miramos podemos conocer su posición (por cuál de los dos agujeros pasa), pero cuando no miramos, las partículas producen una interferencia, cuyo resultado nos ofrece la cantidad de movimiento del electrón, pero no su posición.

Ahora bien, la explicación de esto puede llevarse algo más lejos: tales resultados se deben a la discontinuidad del cuanto de acción, que es la responsable de la dualidad, del indeterminismo y de que no podamos reducir el valor de la interacción observacional más allá del valor crítico de h ¹³.

De ahí que el “mecanismo de la dualidad onda-corpúsculo”, al que me referí en el capítulo anterior, sea h . Veáse cuál es la naturaleza de las propiedades mecánicas en la teoría cuántica y en la clásica.

En física clásica tenemos, por ejemplo, una bala, que ha sido disparada por el dispositivo, y conocemos su velocidad porque sabemos su posición inicial, el momento de su impacto final en la placa y, por supuesto, la distancia que ha recorrido y el tiempo que ha tardado. Con estos datos, podemos trazar mentalmente y saber cuál ha sido su trayectoria sin necesidad de observarla; por tanto, puede averiguarse, sin ningún problema, por cuál de los dos agujeros ha pasado hasta llegar al detector. Incluso, es posible prever esta trayectoria futura, antes de que la realice, porque conocemos su velocidad escalar más la dirección que toma su movimiento, es decir, la velocidad vectorial. La mecánica clásica puede conocer todo esto porque, dentro de su corpus teórico, la medición de las magnitudes

a la posición (por ejemplo), se hace efectiva (con la medición), se forma automáticamente una nueva función con otros valores; nunca podemos dar el valor exacto de la posición y el momento al mismo tiempo; sólo si no medimos, si la función de onda no se colapsa podremos disponer de ambos valores, pero sólo en términos estadísticos.

¹³ En otro lugar, desarrollé esta tesis para aclarar el comportamiento dual de las partículas atómicas, partiendo de la responsabilidad absoluta que posee el cuanto de acción. Lo hice a partir del carácter empírico de la dualidad: una forma de relacionar el modelo corpuscular con las propiedades cinemáticas, a través del fenómeno del “efecto Compton”, y la relación, que el fenómeno de interferencias del electrón sacó a la luz, entre el modelo ondulatorio y la medición de las propiedades dinámicas. Cf. CADENAS GÓMEZ, Y., “El origen de h y su significado físico y epistemológico en las primeras leyes cuánticas”. En: MATAIX, C./RIVADULLA, A. (eds.), Física cuántica y realidad, pp.171-194. Madrid, Editorial Complutense, 2002.

dinámicas no altera las coordenadas geométricas del móvil: el marco espacio-temporal es independiente de los movimientos que se realizan en él; así disponía de mediciones exactas de todos los datos, dinámicos y cinemáticos, que la Mecánica necesita para dar una descripción completa de su movimiento.

Sin embargo, en la teoría cuántica sólo puede conocerse la posición del electrón (modelo corpuscular; propiedades geométricas), se se utilizan propiedades dinámicas (energía, cantidad de movimiento), las cuales se corresponden con el modelo ondulatorio. En esta física la energía se calcula desde este modelo porque está vinculada a la frecuencia por la fórmula de Planck ($\epsilon=h\cdot\nu$) y el impulso porque está unido a la longitud de onda ($p=h/\lambda$). Pero, al hacer esto destruimos la futura evolución dinámica del sistema, con lo cual destruimos el fenómeno de interferencias y viceversa ($p=h/\lambda$; $h=E/\nu$; $h=\lambda\cdot p$; $\epsilon/\nu=\lambda\cdot p$).

Así, tenemos, por un lado, que se necesita el modelo ondulatorio para las definir las magnitudes dinámicas porque, en mecánica cuántica, estas magnitudes ya no se definen desde el modelo corpuscular, donde se construían a partir de las cinemáticas, a las que se les unían los conceptos de masa y fuerza, sino que dichas magnitudes sólo encuentran una *definición precisa* en el modelo ondulatorio, el cual hace abstracción de toda localización espacio-temporal exacta. Tal situación puede verse en la siguiente definición que de Broglie ofrece de la noción de “onda”:

“Esta onda, considerada en su definición más simple, podría decirse que en toda su pureza, es una onda plana monocromática en el sentido habitual de la física matemática: es homogénea en todo el espacio y en todo el transcurso del tiempo, y por consiguiente no atribuye ningún papel privilegiado a algún punto particular del espacio, ni a algún instante particular de la duración; además, se propaga en junto en determinada dirección”¹⁴.

De ahí que se pueda afirmar, como hace este físico francés, que esta nueva relación entre las propiedades dinámicas y el modelo ondulatorio es más apropiada a la noción misma de movimiento que la concepción clásica de éste. De tal modo que el concepto de onda puede entenderse como un símbolo o una idealización del movimiento, de lo dinámico.

Dice de Broglie que si se concibe el movimiento de esta misma forma, “en toda su pureza, sin ningún cuidado de la localización”, entonces

¹⁴ DE BROGLIE, L., Física y microfísica, p. 140.

puede considerarse que la imagen ondulatoria es el símbolo del movimiento; una idealización de éste. Estas consideraciones, sobre la naturaleza de la onda, le dan pie para afirmar que el movimiento ha de ser entendido de esta manera, sin unirlo al marco espacio-temporal estático de las propiedades cinemáticas y, por tanto, la idea de movimiento en su concepción puramente dinámica, que se deduce de las condiciones cuánticas, se ajusta más a una concepción puramente dinámica de él que aquella que se suponía en el marco clásico como la representación estática espacio-temporal de él. Las magnitudes dinámicas son las “causas” del movimiento y, en tanto que en mecánica cuántica (sobre todo en el formalismo de Schrödinger) hay ondas *materiales*, esto es, asociadas a los corpúsculos, y son aquéllas las que “guían”, o las responsables (las causas) del movimiento de los corpúsculos. Citando, de nuevo, al propio autor:

“El corpúsculo es una especie de concepto ideal creado por nuestro espíritu para representar la localización de alguna cosa en un punto del espacio en un instante dado (...). El corpúsculo simboliza, pues, la localización exacta en el cuadro del espacio y del tiempo”¹⁵.

Según de Broglie la explicación del movimiento está en que la discontinuidad cuántica puede dar razón de la “trayectoria continua” del electrón por ser una *apariencia de continuidad* (y no una continuidad real), la cual se debe a una idealización de las condiciones cuánticas realizada en el nivel mesocósmico gracias al pequeño valor que tiene h en relación con los valores de nuestra escala. Dada esta idealización, la física clásica podía manejar el concepto de trayectoria continua de un móvil como la representación gráfica de su movimiento o traslación continua en el marco espacio-temporal.

Ahora bien, ésta es una tesis filosófica que sólo se ha podido plantear en el terreno de la física a partir de la aparición de las nuevas ideas cuánticas. Nunca antes se dio esta unión, o al menos si se dio, el marco clásico se encargó de destruir o ignorar, no sólo entre las propiedades dinámicas y cinemáticas, sino también entre las propiedades dinámicas, que no debe olvidarse que son mecánicas, y las propiedades ondulatorias de la electrodinámica: es la unión de la que se habla cuando se menciona el acuerdo entre Óptica y Mecánica.

¹⁵ *Ibid*, p. 140.

b) El fracaso de la descripción física como representación pictórica

Cuando en el primer capítulo hablé de la representación pictórica, ya advertí que la posibilidad de describir espacio-temporalmente los sistemas físicos se basa en el modelo de representación pictórica. Por lo tanto, una vez que éste ha fallado en mecánica cuántica, se viene abajo el puntal que sostenía a este tipo de descripción en el marco objetivo del espacio y del tiempo. Las nociones de espacio y tiempo, en mecánica cuántica, no coinciden con el espacio de la geometría euclídea ni con el tipo de matematización que se realizó de él en física clásica, por ello no puede coincidir con el espacio de la intuición ni con el tiempo homogéneo: ahora ya no es posible representar objetos en el espacio de la intuición y éste es el significado que tiene tal fracaso.

Schrödinger no aceptó este fracaso y buscó un modelo pictórico del mundo atómico. Estaba convencido de que materia y radiación son entidades esencialmente ondulatorias, que adquieren una apariencia corpuscular cuando su longitud de onda es muy pequeña en relación con el tamaño de la trayectoria de su propagación¹⁶. Con esta idea Schrödinger pretendió restaurar la conexión entre el mundo atómico y el nivel perceptivo u ordinario de la escala humana, cuyo objetivo era conseguir una comprensión intuitiva de las ideas cuánticas a través de una descripción visual, basada en conceptos de nuestra experiencia ordinaria. Ésta fue siempre su postura, luchando contra las nuevas propuestas, más abstractas y alejadas de nuestra concepción cotidiana sobre el mundo físico, las cuales partían de las ideas de indeterminación y de cambio de órbita instantáneo entre los estados de energía.

Bohr no estuvo de acuerdo con esta interpretación realista de Schrödinger en términos ondulatorios, pues ésta no explicaba por qué un contador Geiger registra el paso de los electrones como si se trataran de partículas y no de ondas ni tampoco el fenómeno de la radiación del cuerpo negro si no se incluían las cantidades discretas y los *saltos cuánticos* entre órbitas. Además, tampoco pudo responder a la pregunta acerca de qué es lo que ondula en la materia. Así, en octubre de 1926 Bohr invitó a Schrödinger a pasar unos días en Copenhague con el objeto de discutir sobre el significado de su teoría¹⁷. Esa última cuestión acerca de lo que

¹⁶ Cf. MURDOCH, D., *Niels Bohr's Philosophy of Physics*, p. 43.

¹⁷ Convenciéndole al final de que ésta no había eliminado la discontinuidad en los niveles energéticos del átomo, pero que, no obstante, la mecánica de matrices tampoco había eliminado todos los elementos de continuidad en la teoría cuántica. Cf. BOHR, N., "El postulado

ondula en el átomo era una cuestión fundamental si se pretendía mantener una postura realista acerca de las ondas materiales. Por ello Schrödinger intentó responderla apoyándose en las siguientes hipótesis.

La primera es la de las *nubes electrónicas*: Schrödinger sustituye la imagen del electrón corpuscular por la noción de un campo eléctrico que cubre todos los niveles energéticos del átomo, en el que los electrones se disuelven formando una nube de cargas eléctricas; de esta hipótesis se deduce la presencia del electrón en toda su órbita¹⁸. Esta imagen visualizable sería una representación pictórica, no al modo cartesiano pero sí manteniendo el ideal maxwelliano. En un principio pareció la solución al problema de la descripción espacio-temporal porque concuerda con los fenómenos espectroscópicos, en tanto que las amplitudes de las ondas pueden considerarse como la medida de la densidad de la nube: a mayor oscilación de la onda en una determinada zona, mayor será la densidad eléctrica.

Sin embargo, el hecho de admitir la realidad de estas ondas suscita dos dificultades. Una de ellas es que una región cualquiera de esta nube debe ejercer una fuerza sobre el dominio de otra, pero no se percibe ningún efecto de este hecho en los resultados experimentales ni tampoco se deriva de ningún cálculo del formalismo. Además, es una hipótesis que no sólo carece de todo apoyo, tanto teórico como empírico, sino que también está en contradicción con la experiencia, pues esas fuerzas, al igual que en la imagen corpuscular, serían de repulsión, lo cual haría estallar al electrón¹⁹. De modo que el problema de por qué no estalla no se resuelve sustituyendo al electrón corpuscular por una nube. El otro inconveniente es también muy grave en tanto que la imagen de la nube electrónica no es aplicable fuera del átomo, ya que un rayo catódico es un flujo de partículas que se identifica con la noción de corpúsculo y que esta imagen es incapaz de explicar²⁰.

A causa de las dificultades anteriores Schrödinger modifica su hipótesis y propone que los electrones son *minúsculos paquetes formados*

cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica" (1927), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, pp. 118-119.

¹⁸ Cf. PAPP, D., La doble faz del mundo físico, pp. 138-139.

¹⁹ Las diferentes partes, tanto si son corpusculares como si son regiones de la nube, llevarán cargas eléctricas de igual signo, las cuales se repelen, y, según la ley de Coulomb, por estar infinitamente próximas, se repelerán con fuerzas enormes que provocarían la destrucción del electrón. Cf. PAPP, D., La doble faz del mundo físico, p. 139

²⁰ Cf. *Ibid*, p. 140.

por ondas superpuestas de manera que sus ondas no se desparramarían, con lo cual se conserva la subsistencia del paquete. Pero esta imagen vuelve a encontrarse con la primera dificultad en el momento en que los “paquetes de ondas” tuvieran que atravesar un cristal, pues al difractarse las ondas de éstos deberían dispersarse provocando la destrucción definitiva de los electrones. Hecho que tampoco ocurre, tal y como demuestran los experimentos de Davisson y Germer, que hallaron electrones en los haces difractados.

Por todo esto, Bohr consideró inaceptable la interpretación realista de las ondas de materia, las cuales, al fin y al cabo, carecen de soporte energético, pues toda la energía de la onda se encuentra concentrada en las partículas: en los fotones si se habla de ondas luminosas, y en los electrones si se trata de ondas materiales. Además, el espacio donde oscilan es multidimensional, el llamado *espacio de configuración*, y, por último, los coeficientes de la ecuación de Schrödinger no son todos números reales, los hay también complejos, incluyendo números imaginarios²¹.

Pero, cuando conoció el tratamiento de Born de estas ondas como ondas de probabilidad, las recibió de muy buen grado, porque con esta idea se hacían comprensibles las características de estas ondas que antes no se explicaban²². De este modo, se vuelve evidente el hecho de que una onda si es matemática no tiene por qué ajustarse a nuestro espacio empírico con sólo tres dimensiones. Como tampoco nos asombra que contenga coeficientes imaginarios ni tan siquiera el hecho de que se pueda propagar a una velocidad sin límites, pues si sólo son “cifras indicadoras”, éstas pueden variar con ilimitada rapidez. Además, el hecho de que sea incapaz de transportar energía se convierte en una exigencia lógica, ya que no transportan nada, sólo son *índices de probabilidad*. Con esta interpretación probabilística también se aclara que la onda marche siempre asociada al corpúsculo, indicando la probabilidad de su presencia, y también que los fotones y electrones causen interferencias, permitiendo la conclusión de que en algunas zonas las ondas sólo permitieron una escasa probabilidad de presencia y en otras la probabilidad es mucho mayor.

Las probabilidades habían sido introducidas en la teoría cuántica por Einstein, al utilizarlas como la medida de la intensidad luminosa en su teoría sobre los fotones²³, y Born comprendió la importancia de esta idea²⁴,

²¹ Cf. *Ibid*, p. 144.

²² Cf. *Ibid*, pp. 146-147.

²³ “De esta manera las ondas proporcionan el valor estadístico de la cantidad de fotones en un punto dado. En el caso de un único fotón, la onda determinaría la probabilidad de su presencia

la cual se podía extender al ámbito de la materia: lo que ondula en la materia es la probabilidad de presencia de una partícula material.

“Las partículas son reales, en opinión de Born, pero en cierto sentido son conducidas por las ondas, y la intensidad de la onda (más exactamente, el valor Ψ^2) en cada punto del espacio es una medida de la probabilidad de encontrar la partícula en ese punto. No se puede saber con certeza dónde se sitúa una partícula como el electrón, pero la función de onda permite deducir la probabilidad de que, al realizar un experimento diseñado para localizar al electrón, se le localiza en un determinado sitio. Lo más extraño de esta idea es que acepta que cualquier electrón puede estar en cualquier sitio; lo que indica exactamente es que es probable que esté en algunos sitios y muy improbable en otros. (...) la interpretación de Born de Ψ elimina cierto grado de certeza del ya incierto mundo cuántico”²⁵.

Así pues, una vez que se profundizó en el significado de estas ideas, hubo de admitirse que no solucionaban nada y, al final, las ondas materiales resultaron ser tan abstractas como las matrices de Heisenberg y los números q de Dirac:

“Las matemáticas mostraban que no podía tratarse de ondas reales en el espacio, como las olas de un estanque, sino que representaban una forma compleja de vibraciones en un espacio matemático imaginario llamado el espacio de las fases. Peor aún, cada partícula (por ejemplo, cada electrón) necesita sus propias tres dimensiones. Un electrón aislado se puede describir por una ecuación de ondas en un espacio

en este punto (...). Es esta probabilidad la que se propaga en forma de onda en el espacio y en el tiempo; es esta probabilidad la que obedece a las leyes de Fresnel, a las de la física clásica”. *Ibid*, p. 145.

²⁴ “Once more an idea of Einstein’s gave the lead. He had sought to make the duality of particles (light quanta or photons) and waves comprehensible by interpreting the square of the optical wave amplitudes as probability density for the occurrence of photons. This idea could at once be extended to the ψ -function: $|\psi|^2$ must represent the probability density for electrons (or other particles). To assert this was easy; but how was it to be proved?” BORN, M., “Statistical interpretation of quantum mechanics” (1955), in: Physics in my generation, p. 94.

²⁵ GRIBBIN, J., En busca el gato de Schrödinger, pp. 100-101. Más adelante, sobre todo en el capítulo V, volveré sobre el significado y las implicaciones del carácter estadístico de la física cuántica y su interpretación en términos de probabilidades.

tridimensional; dos electrones requieren seis dimensiones; para tres electrones hacen falta nueve dimensiones, y así, sucesivamente²⁶.

Por su parte, también Bohr pensó hasta 1925 que se podía dar una imagen visualizable de los sistemas atómicos, como la que él había ofrecido en su modelo atómico de 1913, usando una descripción espacio-temporal, basada en parámetros continuos, para definir el estado de los sistemas atómicos, los cuales cambian de estado discontinuamente²⁷. Sin embargo, tras el fracaso de la teoría de Bohr-Kramers-Slater, se tuvo que sacrificar la posibilidad de dar una descripción espacio-temporal de los objetos atómicos, sobre la que se sustenta el modelo continuo de campo electromagnético, al que también hubo que renunciar. Además, el álgebra no conmutativa de las matrices, que introdujo Heisenberg, deja fuera este tipo de descripción, ya que este formalismo se limita exclusivamente a las magnitudes observables: en tanto que el término *observable* no se refiere a nada visualizable, sino a aquello que podemos medir y calcular, Heisenberg renunció a toda posibilidad de ofrecer un modelo explicativo de lo que acontece en el interior del átomo.

Tras la aparición del doble modelo, corpuscular y ondulatorio, para explicar la materia y la radiación, Heisenberg se dio cuenta de que no podemos “imaginar” ni “ver” nada del mundo cuántico porque todas las representaciones mentales que tenemos las hemos tomado de nuestra escala humana, donde sí funciona este tipo de descripción visual y espacio-temporal, basada en términos de magnitudes continuas; así, perdido este punto en común, nada permite extrapolar estas imágenes descriptivas al mundo atómico.

“Por ello debe renunciarse a hacer física imaginativa: es necesario conformarse con lo *estrictamente* mensurable. En una palabra: se debe construir una ciencia de magnitudes observables, que no tendrían más la tarea de hacernos *ver* un modelo, pero sí la de hacernos *prever* los resultados de la experiencia.

Estas magnitudes observables las pone a nuestra disposición el análisis espectral: frecuencias e intensidades de las radiaciones emitidas por los átomos en distintas condiciones de excitación. Las cifras obtenidas estarán sometidas al cálculo. No se harán más imágenes, se harán *matrices*: tablas de números” -que- “reunirán lo que realmente sabemos

²⁶ *Ibid.*, p. 99.

²⁷ Cf. FOLSE, H., The philosophy of Niels Bohr, p. 78.

sobre el átomo. La posición y el impulso del electrón no evocarán nada que sea imaginable, serán matrices”²⁸.

Esta renuncia a los modelos imaginativos es consecuencia de la interpretación de Bohr del problema de la dualidad onda-corpúsculo: si es imposible dar una descripción espacio-temporal bien definida de los procesos atómicos en los intercambios de energía, entonces no es posible obtener un modelo “visual”, ya que, tanto el modelo de onda como el de corpúsculo, ofrecen una imagen del electrón en términos espacio-temporales.

Sin embargo, esta renuncia completa de Heisenberg a las imágenes tendrá una importante consecuencia indeseable para Bohr: se perderá la posibilidad de describir físicamente los sistemas microfísicos, quedando únicamente la descripción matemática, a partir de la cual sólo podemos lanzar predicciones sobre los fenómenos atómicos, pero no ofrece explicación alguna sobre la realidad física que se intenta describir.

“La mecánica de Heisenberg se atiene únicamente a la representación matemática de los fenómenos perceptibles, disuelve el mundo físico en números. Es un magnífico instrumento de cálculo que marca un progreso en la métrica y un retroceso en la descripción”²⁹.

La renuncia, en mecánica, a las imágenes pictóricas va a suponer un grave problema a la hora de dar una descripción física de lo que ocurre en el nivel atómico, ya que, si no podemos obtener una visualización de los sistemas, a través de un sólo modelo unívoco de éstos, los conceptos de la teoría van a perder gran parte del contenido físico, que poseían en el marco clásico como representaciones exactas e inequívocas de los objetos, a través de su imagen o modelo espacio-temporal.

Por un lado, Heisenberg renunció en su formalismo matricial a las imágenes de onda y corpúsculo y perdió la posibilidad de explicar la realidad física, y no sólo describirla matemáticamente. Por otro lado, Schrödinger fracasó al intentar restaurar un tipo de descripción visual, resolviendo el problema de la dualidad en beneficio de las ondas, pues éstas no tenían un significado físico preciso. Así pues, la situación con la que se encontraron los físicos fue ésta:

²⁸ PAPP, D., La doble faz del mundo físico, p. 141.

²⁹ *Ibid*, p. 142.

“Los granos de materia no son paquetes de ondas y las ondas fotónicas o electrónicas no son las medidas de la densidad eléctrica.(...) La función de Schrödinger y las matrices de Heisenberg describen perfectamente las ondas exigidas por los hechos experimentales”, -pero- “... no revelan de ninguna manera la naturaleza física de estas misteriosas entidades. Su existencia nos es impuesta categóricamente por la experiencia”³⁰.

Por tanto, tras la tentativa de Bohr y, en especial, la de Schrödinger de disolver el problema de la dualidad en favor de uno de los aspectos, se comprendió que era inútil tal esfuerzo, que todos estos intentos fracasarían siempre, y, de momento, no quedó otro remedio que aceptar las consecuencias que su aceptación como tal dualidad implicaba. Una de estas implicaciones fue el tener que renunciar a las imágenes descriptivas, las cuales no pueden formarse sin la base del marco espacio-temporal. Otra de las consecuencias fue que se rompe la similitud entre el microcosmos y el mesocosmos, por tanto: “debemos renunciar a todo intento de recrear nuestro universo visible en el universo invisible de los átomos”³¹.

De este modo, el problema de la dualidad acabó con la creencia de la ciencia clásica en que nuestros conceptos son representaciones pictóricas, o visuales, de la realidad³², lo cual afecta al tipo de información que la física nos ofrece del mundo natural, perdiendo, como ya he dicho, buena parte de su capacidad para describir y explicar físicamente la realidad. Además, el contenido físico, también llamado “intuitivo”, de la física clásica se ve afectado por todo esto, ya que está basado en las imágenes espacio-temporales de la geometría de Euclides (un espacio plano y continuo, que se corresponde con el espacio de nuestra percepción) y es lo que capacita a una teoría para cumplir el ideal de descripción física³³.

“Así, el otro aspecto del ideal clásico para una descripción de un sistema físico, esto es, la descripción espacio-temporal, ahora se vuelve

³⁰ PAPP, D., La doble faz del mundo físico, p. 143.

³¹ ORTOLI, S./PHARABOD, P., El cántico de la cuántica, p. 42.

³² Cf. BOHR, N., “El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica” (1927), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, pp. 119-120.

³³ Aunque en física cuántica se pierde gran parte de este contenido, si no todo, Bohr pretende seguir manteniendo dicho ideal descriptivo. Más adelante expondré cómo, a partir de entonces, Bohr impondrá un uso analógico de la terminología física, con el fin de esclarecer estas contradicciones conceptuales que no cesaban de aflorar.

sospechosa. Consecuentemente, es en este punto donde Bohr comienza a considerar la posibilidad de que las representaciones teóricas de los sistemas atómicos aislados, a través de la imagen espacio-temporal de un sistema de partículas, moviéndose sobre trayectorias definidas y la de la radiación en el espacio libre como una onda moviéndose a través de un campo continuo electromagnético, no pueden ser entendidas como una "descripción espacio-temporal ordinaria" (es decir, en el sentido clásico) de los sistemas físicos que son descritos. Una vez que reconoció que la conservación de la energía no podía ser abandonada, el dualismo de las representaciones de partícula y de onda para la radiación electromagnética se convirtió en un hecho que el nuevo marco conceptual debía tener en cuenta. Por esta razón, ahora concentró su atención en cómo las descripciones espacio-temporales tales como "onda" y "partícula" se refieren a los sistemas que antes solían representar³⁴.

Es decir, Bohr tomó conciencia de la posibilidad de que una descripción física se realice desde otro tipo de representación distinta a la típica de la mecánica clásica, donde la descripción espacio-temporal, basada en los modelos ordinarios de nuestras formas de percibir y ordenar los objetos materiales, regulaba el tipo de referencia de los términos físicos. Por esta razón, si tal tipo de representación falla a la hora de describir la realidad física, entonces la visualización clásica o representabilidad pictórica puede ser sustituida, en tanto elemento necesario en la descripción física, por otro tipo de representación, que en el caso de Bohr defiende que es simbólica.

Dicha propuesta parte del fracaso de la descripción espacio-temporal, que de hecho se produjo en la representación de los objetos materiales a nivel atómico, y nos abre a la posibilidad de considerar otros tipos de representación, al tiempo que nos obliga a hacerlo para no quedarnos sin descripción física.

Más adelante, en el sexto capítulo, dividiré, de manera general, estos tipos de representación, en tres: la representabilidad pictórica o visualización clásica, la representabilidad simbólica de Bohr y una tercera que llamo "ostensiva" y que caracteriza la postura de Einstein. De momento, me centraré en las consecuencias de tal fracaso, las cuales originaron nuevos problemas epistemológicos, que expondré a continuación.

³⁴ FOLSE, H., The philosophy of Niels Bohr, pp. 77-78.

c) La ruptura de la descripción causal y espacio-temporal: renuncia al ideal determinista

El problema más grave con el que se enfrenta la física cuántica es que, tras el fracaso de la descripción espacio-temporal, ya no puede obtenerse una imagen de lo que sucede en el mundo atómico; pero, además de esto, dicho fracaso atañe a otra cuestión, que se presenta como una consecuencia de lo anterior. Se trata de lo siguiente: sin la descripción espacio-temporal no se puede dar una descripción completa del estado de los sistemas físicos y, por tanto, el ideal clásico del determinismo físico se vuelve impracticable, puesto que este tipo de descripción es la condición básica e imprescindible para que tal ideal se pueda realizar.

Este tema será analizado por Bohr desde lo que él llamó “las posibilidades de la observación” y de la “definición causal”. La observación determina la descripción espacio-temporal y la aplicación de la causalidad, a través de los principios de conservación, es lo que nos permite definir el estado dinámico de un sistema aislado, con el objeto de predecir su comportamiento mecánico futuro³⁵.

Recuérdese que el modo como el marco clásico combina estos dos aspectos de la descripción mecánica de los sistemas físicos, utilizando como elemento mediador el supuesto de la continuidad, ofrece la posibilidad de dar una descripción completa del sistema, en la que ambos elementos pueden ser precisados con toda exactitud, sin ningún tipo de restricción, y al mismo tiempo. Con lo cual este tipo de descripción completa es determinista, ya que ofrece tanto la posibilidad de precisar las condiciones iniciales del sistema, es decir, su coordinación espacio-temporal a través del ideal de observación en el que el sujeto no interfiere con el objeto, como su evolución causal futura, gracias a una exacta definición de su estado dinámico a través de la aplicación sin restricciones de los principios de conservación.

En otras palabras, tal descripción clásica cumple los requisitos del ideal de la absoluta predictibilidad causal de la evolución de los sistemas físicos en el marco espacio-temporal.

Sin embargo, la física cuántica se encuentra con la imposibilidad de dar tal tipo de descripción completa del sistema, la descripción espacio-temporal causal, con lo cual se pierde la posibilidad teórica del determinismo físico de los sistemas mecánicos. Esto es consecuencia de la

³⁵ Cf. *Ibid*, p. 69.

propiedad no conmutativa de las matrices, lo que convierte a esta peculiar propiedad del formalismo de Heisenberg en una manifestación expresa de las implicaciones que conlleva la introducción del postulado cuántico³⁶.

“Las coordenadas en el espacio-tiempo representan la posición; la causalidad se basa en el conocimiento preciso de las cosas que están ocurriendo, esencialmente en el conocimiento de sus momentos. Las teorías clásicas suponen que se pueden conocer ambas a la vez; la mecánica cuántica demuestra que la precisión en la coordinación del espacio-tiempo se paga con incertidumbre en el momento y, por tanto, en la causalidad”³⁷.

No obstante, la consecuencia más llamativa es que la renuncia a la descripción espacio-temporal hace que la noción de trayectoria, la traslación continua de un móvil en el espacio-tiempo, pierda su sentido. Lo cual es un problema no sólo porque los experimentos en una cámara de niebla muestran la trayectoria del electrón, sino, también, porque plantea a la teoría el problema fundamental acerca de cómo, entonces, se puede dar una descripción completa del sistema si falta uno de los elementos esenciales en la explicación mecánica, y es el poder fijar la trayectoria espacio-temporal del sistema físico. De modo que, Bohr propondrá que esta renuncia sólo sea parcial, con el objeto de poder mantener una descripción mecánica de la Naturaleza en un contexto en el que se ha perdido la posibilidad de ofrecer una descripción visual.

La forma como se puede compaginar esa necesidad teórica, de no renunciar del todo a la descripción espacio-temporal, con el fracaso de los modelos visuales será algo que mostraré más adelante. De momento diré que, planteado el problema de esta forma, su resolución implicará siempre una renuncia al determinismo físico de las teorías clásicas, pues este tipo de

³⁶ “By denying the classical presupposition that systems change state continuously the quantum postulate imperiled the classical union of the modes of space-time description and the use of conservation principles to satisfy the “claims of causality”. As we just noted, the classical descriptive ideal of defining the state of an isolated system through an observation which interacts with it could be a consistent goal only on the presupposition that the change of state of a system can be represented as a continuous path in phase space. Thus establishing a new framework which would harmonize the inconsistency between classical and quantum ideas suggested that the classical ideal of a “causal space-time mode of description” would have to be modified in some serious way. This fact in turn suggested on Bohr’s analysis outlined above that one or the other of the two classical modes of description which were combined in the classical framework would have to be abandoned or remolded”. *Ibid*, p. 70.

³⁷ GRIBBIN, J., En busca del gato de Schrödinger, p. 153.

descripción requiere que se pueda dar una descripción completa, con los valores de la posición y el momento de una partícula simultánea y perfectamente definida.

Esta condición básica es negada una y otra vez por las ecuaciones más fundamentales de las diferentes versiones del formalismo matemático de la mecánica cuántica, incluso desde la mera aparición de h en las primeras fórmulas de la teoría cuántica. Así pues, habrá que *buscar una nueva definición de descripción completa*, que se adapte a las condiciones cuánticas, al tiempo que se pueda seguir considerando una descripción mecánica con un cierto contenido físico. Esto sólo se podrá conseguir a cambio de renunciar a la exigencia clásica de la absoluta predictibilidad causal de los sistemas microfísicos, ya que el futuro de estos sistemas es esencial y matemáticamente incierto, aunque esto no implique una renuncia a toda causalidad en general, ya que no todos los nexos causales han de ser deterministas y necesarios: el determinismo implica causalidad, pero la causalidad no implica determinismo. Se puede entender la relación causal en un sentido más amplio que el que aparece en la noción determinista:

“Consideremos un fenómeno A al cual sucede siempre uno cualquiera de los fenómenos B_1, B_2, B_3, \dots . Si, además, ninguno de los fenómenos B_1, B_2, B_3, \dots se produce si A no se produce, se podrá decir, adoptando una definición amplia de causalidad, que A es la causa de los fenómenos B_1, B_2, B_3, \dots , y esta definición estará de acuerdo con el viejo adagio: «Sublata causa, tollitur effectus». Con esta definición habrá, pues un vínculo de causalidad entre el fenómeno A y los fenómenos B_1, B_2, B_3, \dots , pero ya no habrá determinismo si no podemos de ninguna manera prever *cuál* de los fenómenos B_1, B_2, B_3, \dots va a producirse cuando A se produzca. El determinismo reaparece sólo en el caso límite cuando hay un solo fenómeno B ”³⁸.

La física cuántica no tiene nada en contra de este sentido amplio de causalidad; es más, sin causalidad no podría haber ciencia, aunque sí la hay sin determinismo. De modo que, cuando Bohr o Heisenberg hablan del “fallo definitivo de la causalidad” se refieren a la descripción causal en el espacio y el tiempo, o determinismo, y no a la noción general de causalidad, la cual sólo indica un nexo, de un tipo u otro, entre el antecedente y el consecuente. Sin embargo, Einstein se opondrá a esta idea porque, tal y como analizaré en su momento, entiende que el “fallo de la

³⁸ DE BROGLIE, L., “Reflexiones sobre el indeterminismo en física cuántica”, en: Continuidad y discontinuidad en física moderna, p. 64.

causalidad” atañe a la desaparición de las “causas físicas” en la descripción mecánica del movimiento y la evolución de los microsistemas.

d) El problema de la medida: la mediatización de la interacción observacional en la descripción objetiva

La física clásica había supuesto que las propiedades que se estudian en física son aquellas que los objetos naturales poseen en sí mismos. De ahí que mantuviera un realismo objetivo en cuanto a la representación del mundo, la cual nos ofrece nuestro conocimiento de él. Pero el esquema matemático de la física cuántica ha revelado que estas propiedades no sirven como descripción de una realidad independiente, sino que se trata de magnitudes que aparecen con la observación; con ellas el científico indaga en la Naturaleza para describirla y con ellas opera para manipularla. Razón por la cual, Bohr subrayará tanto la importancia de los experimentos en nuestra comprensión del mundo y de esta forma lo describe Gribbin:

“Sólo se puede investigar el mundo cuántico realizando experimentos, y cada experimento, en efecto, plantea una cuestión del mundo atómico. Las preguntas que se plantean aquí están altamente influidas por la experiencia cotidiana, por lo que si se buscan propiedades tales como momento y longitud de onda se obtienen respuestas que pueden interpretarse en esos mismos términos. Los experimentos se basan en la física clásica, incluso a sabiendas de que la física clásica no es válida como descripción de los procesos atómicos. Además, es necesario interferir en los procesos atómicos si de verdad se desea observarlos, lo que significa, según Bohr que carece de sentido preguntarse qué hacen los átomos cuando no se les está observando. Todo lo que se puede hacer, como Born puso de relieve, es calcular la probabilidad de que un experimento determinado proporcione un resultado concreto”³⁹.

Desde esta postura de Bohr se aclara el misterio acerca de que la función de onda no tenga ninguna de las propiedades bien definida, y el hecho de que se concreten en el momento del colapso provocado por la medición, pues es sólo bajo esta circunstancia, de estar bajo observación, cuando las propiedades adquieren realidad, precisión, y no sólo

³⁹ GRIBBIN, J., En busca del gato de Schrödinger, p. 102.

potencialidad⁴⁰. La razón de esto es que los conceptos desde los que se definieron estas propiedades, o magnitudes, se han revelado carentes de sentido físico preciso en el caso de que pretendamos usarlos fuera del ámbito de una observación⁴¹. Por tanto, todo intento de restaurar el ideal clásico de objetividad conllevará, por un lado, la restauración de la descripción determinista y, por otro, una vuelta al realismo clásico de las propiedades objetivas.

De esta forma, el problema de la medida traerá a colación la renuncia al ideal clásico de observación, ya que ésta se revela como una interacción causal entre el objeto y el observador; por ello, la aparición del postulado cuántico obliga a reconocer que toda descripción física es la descripción de una interacción entre el objeto y el sujeto que lo observa.

Así, cualquier cambio de marco conceptual tendrá que partir de la aceptación de esta interacción observacional irreductible, que trajo consigo el carácter discreto de la discontinuidad cuántica porque, además, de este hecho se derivaron los problemas epistemológicos que la física cuántica mantuvo con el marco clásico: el problema de la medida y su consiguiente renuncia al determinismo, tras el colapso de Ψ ; el problema de cómo ofrecer una descripción objetiva cuando no se puede describir al objeto independientemente del observador; el problema de la noción de objeto en sentido clásico, como “realidad independiente”; e, incluso, se impone la tarea de cómo conciliar un tipo de descripción que respete estas condiciones cuánticas, tan alejadas de las clásicas, con una que contenga un cierto contenido físico-intuitivo, el cual permita comprender la física cuántica y no sólo utilizar las ecuaciones de su formalismo teórico para

⁴⁰ No se trata de que el mundo, como una entidad con existencia propia, se vuelva real al observarlo, sino que las propiedades dinámicas y geométricas, *que se utilizan en la descripción física del mundo que conocemos*, toman valores precisos sólo cuando las medimos y observamos. De tal forma que estas propiedades no son “reales”, en el sentido de independientes del sujeto-observador, sino sólo fenoménicas, razón por la cual la función de onda, únicamente, se colapsa durante una interacción observacional. Además, el hecho de que durante las otras interacciones no se colapse indica que la realidad no está objetivamente determinada por la precisión de tales valores: el mundo físico está indeterminado en términos de estas propiedades.

⁴¹ En el próximo capítulo examinaré esta tesis de Bohr sobre el uso limitado, aunque imprescindible, de los conceptos clásicos y su teoría de las propiedades y del fenómeno cuántico, como solución a este problema planteado por la dependencia entre sujeto y objeto en la interacción observacional.

predecir o describir matemáticamente, esto es, donde se cumpla el ideal descriptivo y explicativo de la ciencia moderna⁴².

He dicho que el problema de la medición ha puesto al descubierto que la mediatización de la interacción observacional es ineludible, ya que esta interacción entre el observador y el experimento no puede ser ignorada, debido a la discontinuidad cuántica. El mejor ejemplo de esta interacción se puede encontrar, retomando el experimento de la *dobles rendija*⁴³. En éste, puede interpretarse que un fotón pasa por las dos ranuras a la vez cuando no se le está observando, y es que en este caso se encuentra en una superposición de estados que, como ya se vió, significa que su estado está indeterminado. Por tanto, son las posibilidades de esta superposición, expresadas por la función de onda de cada fotón, las que interfieren y provocan el fenómeno de interferencias observado en la placa fotográfica.

En consecuencia, nuestro conocimiento de la realidad física partirá de la observación y no podremos salir de ella porque la observación sólo puede tener sentido dentro de su propio contexto experimental. Es más, toda pretensión de usar el conocimiento, que ella nos ofrece, para explicarnos el mundo al margen de la observación, es una extrapolación ilícita que nos llevará a concepciones fantasmagóricas de la Naturaleza:

“Si se insiste en solicitar una imagen física de lo que ocurre se encontrará todas las explicaciones disueltas en un mundo de fantasmas donde las partículas sólo parecen reales cuando se las observa, y donde incluso propiedades como el momento y la posición son únicamente artilugios de las observaciones”⁴⁴.

⁴² De momento no especificaré nada más acerca del significado de la expresión “contenido físico” o “contenido intuitivo”. Sólo a partir del capítulo V se hace necesario una precisión mayor sobre esta noción para aclarar los argumentos que se expondrán entonces.

⁴³ Cf. FEYNMAN, R., El carácter de la ley física, pp. 109-127; y también: GRIBBIN, J., En busca del gato de Schrödinger, pp. 148-150; o, JAUCH, J.M., Sobre la realidad de los cuantos, pp. 102-113.

⁴⁴ GRIBBIN, J., En busca del gato de Schrödinger, p. 152. Y un poco más arriba: “... las reglas que resultan tan fiables en el diseño de láseres y computadores, o en el estudio de material genético, se basan explícitamente en la hipótesis de que miríadas de partículas fantasmas interfieren constantemente entre sí y que sólo se funden en una única partícula real cuando la función de onda se colapsa durante una observación. Y lo que aún es peor, en cuanto se detiene la observación del electrón, o de lo que sea, éste se desdobra inmediatamente en una nueva colección de partículas fantasmas, cada una siguiendo su propio camino aleatorio a través del mundo cuántico. Nada es real salvo que sea observado, y cesa de ser real en cuanto se detiene la observación”.

El hecho de que no se pueda conocer nada al margen de la observación hace que el papel del sujeto en la medida de los sistemas microfísicos adquiera un gran relieve dentro del nuevo marco conceptual de la microfísica⁴⁵. Esta intervención del observador tiene dos tipos de implicaciones. 1) En la medida que el científico usa instrumentos para observar el sistema, provoca la aparición de las propiedades que quiere observar y medir, perdiéndose el sentido de “propiedad objetiva”. 2) En tanto que cada instrumento que utiliza sólo puede medir una de las propiedades, la elección por parte del científico del aparato de medida que va a utilizar será lo que determine el tipo de propiedad que se mostrará bien definida⁴⁶. De modo que, durante el proceso de medida no sólo se interfiere con el objeto observado, sino que esta interferencia es la que hace que se precisen sus propiedades; asimismo, más que perturbar el sistema lo que hacemos es atribuirle unas propiedades de las que carece si el sujeto no interviene con sus aparatos de medida para observarlo⁴⁷.

El motivo es que la observación a través de las magnitudes físicas es un acto humano que no se da en la Naturaleza al margen y con independencia del observador. Éste será el hecho básico desde el que la nueva concepción del mundo físico habrá de partir para garantizar el tipo de información que ofrece la microfísica acerca de la realidad cuántica. Pero consigue esto a costa de que la observación pierda su rasgo de objetividad sobre la que se levantaba el ideal clásico de descripción objetiva.

En el marco clásico una descripción objetiva era aquella que daba cuenta de los objetos tal y como son en sí mismos, es decir, describía la realidad independiente del sujeto que la conocía, a través de unas propiedades objetivas que sólo le correspondían al objeto; así, ambas

⁴⁵ No obstante, esta inclusión del sujeto en la descripción sólo se realiza en tanto que “sujeto empírico”, nunca gnoseológico.

⁴⁶ La *decisión del experimentador* no afecta al hecho de que las magnitudes físicas sólo aparezcan cuando se las observa, pues este hecho está provocado únicamente por su intervención con aparatos de medida preparados específicamente para medir estas propiedades, ni tampoco al hecho de que unas excluyan a las otras, ya que esto es el efecto directo del carácter esencialmente discontinuo de la naturaleza. A lo único que afecta es a la elección de la propiedad que va a mostrar el experimento, es decir, conocemos lo que queremos conocer, pero no lo creamos con nuestra decisión; por ello, no tiene ninguna justificación hablar de “voluntarismo” en esta concepción de la realidad microfísica.

⁴⁷ Esta matización la realizó el propio Bohr, como se verá en su momento, tras sus discusiones con Einstein.

nociones, objetividad y realismo, aparecían estrechamente unidas gracias al vínculo que, el realismo racionalista de la ciencia moderna, estableció entre los objetos del mundo físico y nuestros conceptos descriptivos, siguiendo el postulado clásico del “representacionismo pictórico” y de las propiedades objetivas. La discontinuidad cuántica rompe aquel vínculo entre ambas nociones, dado que no permite hablar de la descripción de una “realidad independiente”, pero sí de una descripción objetiva. Aunque, eso sí, para ello tiene que dar otro significado al concepto de objetividad y demostrar que su identificación con la noción de “realidad independiente” es una idealización más del marco clásico que se vuelve impracticable y paradójica fuera del dominio que estas teorías clásicas abarcan⁴⁸.

El ataque a esta vinculación de ambas nociones viene de la crítica a la noción de “sistema aislado de las interacciones externas”, porque lo que estos sistemas implican es que existen objetos independientes de la observación: una realidad independiente que es descrita tal y como es ella misma, siendo esta descripción la que llaman “objetiva” en el marco clásico. Así, tanto la noción de “sistema aislado” como la de “realidad independiente” tenían sentido y carecían de ambigüedad. Sin embargo, la única razón por la que podían defender esto era que partían del supuesto de la continuidad en los procesos naturales, con las consecuencias que esto arroja sobre el acto de la observación⁴⁹. Como ya dije, si se acepta el inherente rasgo de discontinuidad del postulado cuántico, la interacción entre el sistema observado y el sistema de medida no es despreciable y no puede ser ignorado; por tanto, no podemos seguir hablando de “sistemas aislados” y al mismo tiempo pretender que esta noción tenga referencia empírica, y mucho menos que haga referencia expresa a una “realidad independiente”, dado que la teoría cuántica impide esta posibilidad de

⁴⁸ Ésta es la primera embestida contra el realismo de la física clásica, ya que, si separamos las nociones de realismo y de objetividad, el único realismo que se puede defender en física cuántica, si es que se puede mantener alguno, implica una realidad que no es “objetiva”, en el sentido de realidad físicamente independiente del sujeto empírico, de los mecanismos de experimentación, de observación y de medida, y por tanto, la descripción física de la teoría sólo ofrecerá información acerca del conocimiento que se tiene de esa realidad y no una información directa de la realidad en sí, independiente.

⁴⁹ Esto es, que el efecto de la medición es susceptible de ser reducido hasta el infinito, con lo cual el sistema no se ve afectado por el hecho de ser observado: la interacción entre ellos es despreciable.

hecho y teóricamente⁵⁰. Así pues, no se hablará de realidad física como una realidad independiente, sino de una realidad fenoménica en la que hay que incluir al observador con sus instrumentos de medida:

“(…) en física cuántica el observador interactúa con el sistema en tal medida que el sistema no puede considerarse con una existencia independiente. Escogiendo medir con precisión la posición se fuerza a una partícula a presentar mayor incertidumbre en su momento, y viceversa; escogiendo un experimento para medir propiedades ondulatorias, se eliminan peculiaridades corpusculares, y ningún experimento puede revelar ambos aspectos, el ondulatorio y el corpuscular, simultáneamente. (…).

Ésta es la característica esencial del mundo cuántico. Es interesante constatar que hay límites al conocimiento sobre lo que un electrón está haciendo mientras se le observa, pero resulta absolutamente sorprendente descubrir que no se tiene ni idea de lo que está haciendo cuando no lo observamos”⁵¹.

No obstante, si despojamos al concepto de “descripción objetiva” de este bagaje clásico, nos encontramos con un sentido más profundo de *objetividad*: una descripción será objetiva cuando describa de forma inambigua las experiencias físicas. El peso de su significado⁵² recaerá sobre las condiciones intersubjetivas de un lenguaje con contenido físico, en el que se disuelvan las paradojas y aporte una información inequívoca acerca de los sistemas atómicos⁵³. Aunque este sentido no es completamente nuevo o distinto, sino sólo más profundo, pues ya estaba presente en la noción clásica de objetividad, sólo que eclipsado por su vinculación a la contundente y llamativa noción de “realidad independiente”.

⁵⁰ Cf. BOHR, N., “El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica” (1927), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, p. 99; y también, “Física y culturas humanas” (1938), en: Física atómica y conocimiento humano, p. 31.

⁵¹ GRIBBIN, J., En busca del gato de Schrödinger, pp. 139-140.

⁵² Aunque no el de su validez, el cual, como podrá comprobarse más adelante, no sólo se basa en la descripción de toda la situación experimental, sino también en una cierta referencia a los objetos.

⁵³ Esta cuestión la desarrollaré cuando hable de los componentes de la “lección epistemológica” de Bohr.

3.2) *Las Condiciones Epistemológicas de la Descripción Cuántica*

El afianzamiento progresivo del problema de la dualidad será, en parte, resuelto por Born cuando propuso que esas ondas sólo eran *ondas de probabilidad*. De modo que las leyes causales se sustituyen por leyes de probabilidad que “por lo que se refería a su estructura matemática, asumían una forma ondulatoria”⁵⁴. Estas probabilidades pueden entenderse como una “indeterminación específica para la predicción de la trayectoria de las partículas”⁵⁵, principio de indeterminación.

Así estaban las cosas en el momento en que Bohr comenzó sus reflexiones acerca del significado de lo que estaba ocurriendo en la física: situación que comenzó a perfilarse a partir del postulado cuántico y que culminó con los formalismos matemáticos del nuevo cuerpo teórico. Este apartado hará de prelude a la postura que mantuvo Bohr en las discusiones sobre la interpretación física del formalismo cuántico.

Sólo la mera exposición de los hechos evidencia que la postura que toma Bohr hacia los problemas conceptuales no está desligada en absoluto del esquema teórico; todo lo contrario, se deriva directamente de él, ya que todas sus reflexiones epistemológicas parten del formalismo de la teoría, que *tan bien* ha sido corroborada una y otra vez por todas las experiencias, y que *tan bien* describe, matemáticamente, todos los fenómenos microfísicos.

a) Inseparabilidad sujeto-objeto y discontinuidad cuántica en la descripción física

Resaltaré, una vez más, cómo la forma en que el postulado cuántico aparece en el escenario de la física es interesante para el análisis epistemológico en la medida en que ilustran la *batalla* entre los cuantos y los científicos. Su extraordinario poder aclaratorio fue capaz de imponerse sobre aquellos inconvenientes que su aceptación implicaba, de forma que sólo él fue el desencadenante de una de las mayores revoluciones, física y epistemológica, que ha conocido la racionalidad científica.

En esta doble revolución, fue la construcción de la nueva física la que creó la necesidad de otro marco conceptual desde el que poder asumir

⁵⁴ REICHENBACH, “¿Existen los átomos?”, p. 183.

⁵⁵ *Ibid*, p. 184.

este postulado, guiando el nuevo giro epistemológico que se ha de dar para que el proceso de conceptualización de la física corra parejo a su avance en la investigación de nuevos campos de experiencia y de teorización. Con la finalidad última de que la teoría sea explicativa además de operativa, es decir, que tenga un contenido físico, desde el que poder *comprender* el comportamiento de la Naturaleza⁵⁶. De forma que la discontinuidad esencial que introduce el postulado cuántico en la Naturaleza será el postulado básico del que ha de partir la nueva conceptualización de la realidad física, sustituyendo a su homólogo en el marco clásico, el postulado de la continuidad. La primera consecuencia que introduce esta discontinuidad es la inseparabilidad sujeto-objeto, de la cual se deriva el problema del fracaso de la descripción clásicamente objetiva, que, a su vez, provoca la crisis de los modelos visuales, como representaciones pictóricas de la realidad, y la ruptura de la descripción causal y espacio-temporal. De la siguiente forma lo cuenta Bohr:

“Así, en contradicción con la condición de continuidad característica de la descripción ordinaria de la naturaleza, la indivisibilidad del cuanto de acción exige la introducción de un elemento esencial de discontinuidad en la descripción de los fenómenos atómicos (...). La renuncia a la representación intuitiva y a la causalidad a la que nos vemos forzados en la descripción de los fenómenos atómicos podría parecer decepcionante (...). En realidad, ha sido el descubrimiento del cuanto de acción el que nos ha enseñado que la física clásica tiene un rango de validez limitado, enfrentándonos, a la vez, a una situación sin precedentes en la física al plantear bajo una nueva forma el viejo problema filosófico de la existencia objetiva de los fenómenos con independencia de nuestras observaciones. Como hemos visto, toda observación entraña una interferencia de tal índole con el curso de los fenómenos que deja sin sentido a los fundamentos que subyacen al modo causal de descripción. El límite que la Naturaleza misma nos ha impuesto respecto a la posibilidad de hablar de los fenómenos como algo que existe objetivamente encuentra su expresión, en la medida en la que la podamos establecer, justo en la formulación de la mecánica cuántica. No obstante, no debería verse esto como un obstáculo para el avance posterior; lo único para lo que debemos estar preparados es para

⁵⁶ A h , como magnitud física, le corresponde su propio concepto explicativo, éste es la idea de discontinuidad esencial de la Naturaleza, representado por el postulado cuántico, en torno al cual se edificará el nuevo marco teórico.

renunciar cada vez más a la necesidad habitual de usar representaciones intuitivas inmediatas en la descripción de la Naturaleza”⁵⁷.

Comenzaré por la cuestión de la objetividad. He dicho que la noción clásica, como una de las condiciones para la descripción física, es sustituida por otro sentido de objetividad en la que no se vincula al “realismo clásico”, sin embargo, la noción de objetividad, no como descripción objetiva, sino como el objeto al que hace referencia nuestro conocimiento, no es abolida por Bohr, sólo implica la aceptación de un tipo de realismo diferente⁵⁸.

La consecuencia que tuvo esta expansión de la experiencia humana fue que los conceptos clásicos descriptivos de onda y partícula se entenderán más bien como atributos de estado de los fenómenos, y no como sustancias (propiedades objetivas o sustanciales), porque sólo pueden referirse a las propiedades de los objetos fenoménicos y no a aquéllas propias de una realidad física independiente, ya que no puede separarse al objeto de su dispositivo experimental; por tanto, la objetividad será una propiedad de las descripciones, y no de algo que está más allá del mundo del fenómeno, aunque no deje de aludir a él. En el próximo capítulo me detendré más en esto y se podrá comprobar que el instrumentalismo de Bohr se sitúa únicamente en la noción de sistema aislado, porque ésta es una abstracción que se utiliza como mero instrumento, sin ningún tipo de referencia, debido a que los conceptos de onda y partícula son fenoménicos y no sirven para describir nada fuera de la interacción observacional⁵⁹.

Así como no se podrá ya concebir la objetividad como aquello que afecta a algo más allá del fenómeno, sino que sería una propiedad de las descripciones, tampoco puede concebirse la relación entre conceptos y

⁵⁷ BOHR, N., “La teoría atómica y los principios fundamentales de la descripción de la Naturaleza” (1929), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, pp. 146 y 153.

⁵⁸ “Bohr certainly believed the atomic system was an independently existing physical reality; he regard atomic physics as the attempt to gain empirical knowledge about these entities. His point was that we cannot describe these systems like classical physics described plantes and billiard balls. In this spirit he repeatedly cautioned against using the classical mechanical concepts to try to describe independently existing atomic systems. Moreover he was extremely reluctant to comment about the nature of the atomic domain other than how we must describe the observational interactions through which it presents its phenomenal manifestations. Thus in spite of the fact that his move to a new framework implied revision in ontology, Bohr refused to venture into ontological discussions”. FOLSE, H., The Philosophy of Niels Bohr, pp. 25-26.

⁵⁹ Cf. *Ibid*, p. 244.

realidad como si aquéllos la representaran objetivamente. Esta relación era la que se establecía en el marco clásico, pero si se quiere conservar la coherencia, inambigüedad y la objetividad de la física, debe ser cambiada por una relación entre el *concepto* y el *fenómeno*, y nunca considerar la realidad al margen de la observación; de forma que, el concepto sólo describa fenómenos porque, en definitiva, es lo único que pueden hacer.

Aun así, a la pregunta acerca de qué es lo que podemos saber o decir del objeto con sentido físico se debe responder que nada. Porque la condición para hablar con sentido dentro del ámbito de la microfísica está determinada por los siguientes puntos: 1) la observación es interacción del objeto con el instrumento; 2) la interacción observacional, que incluye tanto al objeto como al instrumento de medida, es la que ofrece los valores de los parámetros físicos como propiedades de los fenómenos; 3) La interacción es discontinua, lo cual impide suponer cuál es el valor siguiente a la medición si no seguimos midiendo, es decir, interactuando u observando, pues, en realidad, este valor no existe como tal si no hay medición.

Además de esto, si, como se ha visto, no es posible separar al objeto de su dispositivo experimental y, ya que se ha de elegir el tipo de propiedad que se quiere dejar bien definida a través de la elección de un tipo u otro de dispositivo, el ideal de descripción mecánica completa se vuelve impracticable. Una descripción completa en física clásica era aquella que abarcaba todos los “observables” sin restricción alguna, pues todos eran compatibles. De modo que, el ideal determinista de una explicación causal y espacio-temporal era totalmente factible, pues se podía disponer de los valores de las magnitudes cinemáticas y dinámicas simultáneamente y con igual exactitud. En cambio, las nuevas condiciones epistemológicas de la física cuántica, en concreto, la no-conmutabilidad de las matrices, implica que no todos los “observables” son compatibles⁶⁰ y, por tanto, que se ha de elegir entre una descripción geométrica o dinámica de los sistemas físicos; pero, si se ha de dar una descripción completa, hemos de incluirlos a todos, lo cual quiere decir que debemos hacer simultáneo lo que no puede presentarse así, en física cuántica, sin perder la exactitud de los valores geométricos y dinámicos.

La razón última de esto es la inseparabilidad sujeto-objeto en la nueva noción de observación y de objetividad: el carácter de integridad de

⁶⁰ Los cuales han revelado su incompatibilidad a la luz de los nuevos acontecimientos físicos, ya analizados, anteriormente, en esta exposición.

los fenómenos cuánticos⁶¹. Es decir, cada elemento de la descripción completa ha de cumplir el requisito de estar bien definido y este requisito ahora sólo se cumple por separado, si se tiene en cuenta el carácter de individualidad que el postulado cuántico ha introducido en los fenómenos: la inseparabilidad del objeto respecto de su dispositivo experimental.

“... según la teoría clásica toda nueva observación permite predecir el curso de los fenómenos con una precisión cada vez mayor, dado que nos proporciona un conocimiento gradual y más exacto del estado inicial del sistema. Por el contrario, en la teoría cuántica cada observación introduce un elemento por completo nuevo e incontrolable, como consecuencia de la imposibilidad de despreñar la interacción con el instrumento de medida”⁶².

No obstante, que se tenga que prescindir del ideal descriptivo determinista no implica una renuncia completa a la causalidad, como dije antes: las condiciones del nuevo marco conceptual estipularán que la descripción mecánica y completa de los sistemas físicos se haga en función de una causalidad débil, cuyo nexo entre causa y efecto será de carácter estadístico. El marco conceptual de la física clásica identifica las nociones de causalidad y determinismo porque la causalidad, con la que trata, siempre es determinista; por esto Bohr lo llama “el marco de la causalidad”. Sin embargo, son dos nociones distintas, ya que el determinismo es sólo un tipo de causalidad. Últimamente, se ha matizado este término con la finalidad de distinguir entre la descripción causal rigurosa, también llamada “causalidad determinista” o “causalidad fuerte”, y la “causalidad estadística” o “débil”. La primera conlleva un vínculo de necesidad y continuidad en la evolución causal del sistema, donde, puesta la causa, se puede predecir el efecto futuro, de modo que se supone la previsibilidad rigurosa de todos los fenómenos, como una consecuencia de la naturaleza determinista de ese vínculo. En cambio, el vínculo de la segunda es contingente y de carácter estadístico, dado que no podemos prever su evolución causal de forma rigurosa: puesta la causa sólo tenemos la probabilidad de darse uno u otro fenómeno, pero no la certeza; no, al menos, hasta que no se haya hecho efectiva esa probabilidad futura, es decir, hasta que la función de onda no haya colapsado, pero este colapso es,

⁶¹ Cf. BOHR, N., “Luz y vida” (1932), en: Física atómica y conocimiento humano, pp. 9-10.

⁶² BOHR, N., “El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica” (1927), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, p. 112.

como ya se sabe, lo que impide, precisamente, seguir la evolución del sistema cuando dejamos de observarlo.

“Nosotros no asumimos que la teoría cuántica -en oposición a la teoría clásica- sea esencialmente estadística en el sentido de que sólo pueden sacarse conclusiones estadísticas de los precisos datos iniciales (...). Antes bien, en todos los casos en los que las relaciones que existen en la teoría clásica entre cantidades, las cuales realmente son del todo exactamente mensurables, las correspondientes exactas relaciones casi se sostienen en la teoría cuántica (leyes de conservación del momento y la energía). Pero lo que está equivocado en la formulación fuerte de la ley de causalidad, “cuando conocemos el presente con exactitud, podemos predecir el futuro”, no es la conclusión sino la suposición. Ni por principio podemos conocer el presente con todo detalle. Por esta razón todo objeto observado es una selección de un conjunto de posibilidades y una limitación sobre lo que es posible en el futuro”⁶³.

En consecuencia, aquello que se perderá, a cambio de conseguir una descripción completa, es la posibilidad de llevar a cabo una descripción determinista, ya que sólo pueden conjugarse ambos tipos de descripción a través de las condiciones que estipula h , es decir, sólo si se renuncia a la exactitud de los datos de la descripción mecánica, y con aquella al ideal de la absoluta predictibilidad causal, tal y como exige la introducción del cuanto de acción en la física:

“Ahora bien -y ésta es precisamente la característica peculiar de la descripción cuántica- el cuanto de acción nos obliga a utilizar distintos dispositivos experimentales para obtener una medida exacta de las diferentes magnitudes cuyo conocimiento simultáneo sería necesario para una descripción completa basada en las teorías clásicas, y aún más, los resultados de estas medidas no pueden completarse por medidas repetidas”⁶⁴.

En definitiva, se ha comprobado que la discontinuidad cuántica provoca la inseparabilidad sujeto-objeto y aquella es también la responsable del fracaso de la descripción clásicamente objetiva y de los modelos

⁶³ HEISENBERG, W., “The Physical Content of Quantum Kinematics and Mechanics”, en: WHEELER, P.A./ZURECK, M.Z. (eds.), Quantum Theory and Measurement, p. 83.

⁶⁴ BOHR, N., “Introducción” (1929), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, p. 65.

visuales, además de la renuncia al ideal determinista de la absoluta predictibilidad causal.

Por este motivo, Bohr piensa que la inseparabilidad sujeto-objeto no sólo es la causante del fenomenismo de la física cuántica, sino también de no poder dar una descripción causal precisa en el espacio y en el tiempo⁶⁵ y, por tanto, de la incertidumbre y de las probabilidades. Pero, también es la que disuelve el problema de la dualidad onda-corpúsculo, al volver compatible lo que clásicamente era incompatible, por requerir tener en cuenta el dispositivo experimental, a través de la cual se obtendrá, además, la clave para compatibilizar lo que cuánticamente se ha revelado incompatible: la descripción causal y la espacio-temporal.

De ahí que ésta, la inseparabilidad sujeto-objeto y la discontinuidad cuántica⁶⁶, sea una de las tres condiciones esenciales de las que ha de partir el análisis epistemológico para crear un nuevo marco conceptual que se adecúe a ellas.

b) Imprescindibilidad de las nociones clásicas: uso de los conceptos descriptivos

Bohr pensaba que no era posible renunciar a las nociones clásicas, a pesar de su incapacidad, en el nivel atómico, de ofrecer modelos visuales de la realidad. Una de las razones que descubrió acerca de por qué los conceptos clásicos son indispensables para describir la realidad física y que, por tanto, constituyen una de las claves para conseguir una interpretación conceptual adecuada del formalismo cuántico, fue que los conceptos llamados “clásicos” no son exclusivos de la física clásica, sino del mundo fenoménico que ellos describen.

⁶⁵ “Además, hemos logrado elucidar, gradualmente y por completo, la íntima relación que une, en la descripción mecánico-cuántica de los fenómenos, la necesidad de renunciar a la causalidad y la limitación de la posibilidad de establecer una distinción entre un fenómeno y su observación, condicionada por la individualidad del cuanto de acción. El reconocimiento de esta situación supone un cambio esencial en nuestra actitud tanto hacia el principio de causalidad como hacia el concepto de observación”. *Ibid*, p. 55.

⁶⁶ O, como también la llama Bohr, la “indivisibilidad” del cuanto de acción, que es una de las tres condiciones. Otra será su tesis sobre la imprescindibilidad de los conceptos clásicos para describir la realidad física y la tercera, que consiste en la noción de ampliación del marco conceptual, basada en las ideas de limitación e idealización del marco clásico, la propuso a partir del principio de correspondencia.

“(…) la limitación de nuestras formas de intuición en modo alguno significa que en la coordinación de nuestras impresiones sensibles podamos prescindir de nuestras ideas habituales o de sus expresiones verbales directas. Tampoco es probable que los conceptos fundamentales de las teorías clásicas lleguen nunca a ser superfluos para la descripción de la experiencia física. El reconocimiento de la indivisibilidad del cuanto de acción y la determinación de su magnitud no dependen sólo del análisis de las medidas basado en los conceptos clásicos, sino que es la aplicación de esos conceptos lo único que permite establecer la relación entre el simbolismo de la teoría cuántica y los datos de la experiencia. Pero, al mismo tiempo, debemos tener presente que la posibilidad de un uso *inequívoco* de esos conceptos fundamentales se apoya sólo en la coherencia de las teorías clásicas de las que se derivan y que, por consiguiente, el rango de aplicación de estos conceptos está determinado, según la naturaleza misma de las cosas, por la medida en la cual podemos prescindir, en la interpretación de los fenómenos, del elemento extraño a las teorías clásicas y simbolizado por el cuanto de acción”⁶⁷.

Bohr vio en los términos clásicos un significado más amplio que el de una terminología específica y restringida al ámbito de una teoría física: son conceptos que, si bien se usan para describir el mundo macroscópico en el dominio de la física clásica, en realidad son términos que han surgido de nuestra experiencia ordinaria, pues así es como nacen todos los conceptos, esto es, de la observación a través de la percepción humana. Lo que hizo el marco clásico fue refinarlos y adaptarlos a las condiciones propuestas por los postulados en los que se basó⁶⁸; sin embargo, el sentido más general que Bohr apunta le permite la posibilidad de usar estos términos bajo otras condiciones, cambiando el tipo de relaciones que mantenían dentro del anterior marco conceptual, sin tener que sustituirlos, por otras más adecuadas al nuevo ámbito de los microfenómenos.

“En los dos casos⁶⁹ nos enfrentamos a leyes físicas que caen fuera del dominio de nuestra experiencia ordinaria y que presentan dificultades a

⁶⁷ BOHR, N., “Introducción” (1929), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, pp. 63-64. Al igual que en este párrafo en muchos otros también, Bohr emplea la expresión “formas de intuición”. Sin embargo no debe entenderse con las connotaciones kantianas; Bohr sólo se refiere a nuestras formas de percibir el mundo o de ordenar el material sensible.

⁶⁸ Siguiendo el proceso que analicé en el primer capítulo.

⁶⁹ Bohr se refiere a la teoría de la relatividad y a la teoría cuántica.

nuestras formas usuales de intuición. Constatamos que esas formas de intuición son *idealizaciones*, cuya idoneidad a la hora de ordenar nuestras impresiones sensibles depende de la propagación prácticamente instantánea de la luz y de la pequeñez del cuanto de acción. No obstante, para apreciar de una forma correcta la situación no debemos olvidar que, a pesar de su limitación, en modo alguno podemos prescindir de aquellas formas de intuición que colorean todo nuestro lenguaje y en términos de las cuales debe expresarse en última instancia toda experiencia. Este es el estado de cosas que, ante todo, confiere a los problemas de los que se trata un interés filosófico general”⁷⁰.

El hecho de que todos nuestros conceptos tengan su origen en la observación humana⁷¹, junto con la imposibilidad de una observación directa e independiente del sujeto⁷², no permite disponer de otros nuevos conceptos, propiamente cuánticos, al tiempo que hace imprescindible el uso de los clásicos. Por tanto, el lenguaje ordinario se convierte en la base indispensable de toda posible interpretación del formalismo cuántico y es el que aporta el contenido físico de la teoría cuántica a su esquema matemático⁷³. Por esto Bohr considera imposible, o impracticable, la idea de renunciar a estos conceptos y crear otros nuevos, porque con ello lo que se pretendería sería cambiar el mundo fenoménico, el mundo tal y como se nos presenta a nuestra percepción, el mundo que podemos observar y describir.

“Para muchos físicos este dualismo onda-partícula puede indicar que los conceptos de onda y partícula deben ser abandonados, y nuevos conceptos deben ser desarrollados para describir los fenómenos atómicos. Pero Bohr vio que, ya que en cada caso singular las predicciones teóricas que usaban conceptos clásicos describían los fenómenos inambiguamente, no había absolutamente ninguna inconsistencia en usar los conceptos de onda y partícula para describir los fenómenos. Así, la “paradoja” del dualismo onda-partícula era el

⁷⁰ BOHR, N., “Introducción” (1929), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, pp. 55-56.

⁷¹ Aunque, luego, sean todo lo refinados por la teoría que uno quiera.

⁷² La cual es provocada por la discontinuidad esencial del cuanto de acción.

⁷³ El problema es que este lenguaje está profundamente arraigado en el postulado de la continuidad, de ahí que éste sea el punto capital del “malabarismo” conceptual, que Bohr realizará en su segunda formulación del principio de correspondencia, para que puedan usarse de forma complementaria en la nueva teoría.

resultado del supuesto filosófico acerca de que la razón de que estas imágenes clásicas describieran así los fenómenos es porque los parámetros espacio-temporales en términos de los cuales esas imágenes son definidas también se refieren a las propiedades poseídas por los sistemas aparte de cualquier interacción en la que son observadas”⁷⁴.

En este recurso a los conceptos clásicos vuelve a aparecer el problema de la dualidad continuo-discontinuo en la medida en que los conceptos clásicos han sido construidos sobre la base de la supuesta continuidad en la variación de los intercambios energéticos:

“La formulación más precisa del contenido de la teoría cuántica aparece, no obstante, como extremadamente difícil cuando se observa que todos los conceptos de las teorías existentes se basan en representaciones que exigen la posibilidad de variaciones continuas”⁷⁵.

Sin embargo, a pesar de que la renuncia a las imágenes pictóricas hizo que fuera imposible usarlas en el sentido clásico, para obtener modelos que representaran pictóricamente la realidad como algo que existe independientemente de nuestra observación, Bohr se resistió a su total abandono porque sin ellos se pierde la conexión entre las matemáticas de la teoría y su base empírica. Además del hecho de que nuestros dispositivos experimentales se construyen y están definidos en base a la terminología clásica propia de la escala macrocósmica y, ya que se han vuelto imprescindibles para describir el fenómeno observado, no debemos renunciar totalmente a ellos sino únicamente al uso que tienen en el marco clásico, puesto que los necesitamos para comunicar la información que se ha obtenido a través de nuestros aparatos de medida.

Así pues, durante esta época anterior a 1927, aunque Bohr no tenía muy claro cómo el nuevo marco conceptual alteraría el uso de estos conceptos, se propuso encontrar la manera de conservar algún tipo de uso para estas imágenes descriptivas, que contienen las nociones clásicas. Bohr aún no disponía de este nuevo marco pero lo que sí sabía era que en cualquier caso estos conceptos no podían ser usados como en el marco anterior, es decir, como representaciones exactas de una realidad independiente, pues esta posibilidad se perdió en el momento en que la

⁷⁴ FOLSE, H., *The philosophy of Niels Bohr*, p. 102.

⁷⁵ BOHR, N., “La teoría atómica y la mecánica” (1925), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, p. 75.

discontinuidad de los procesos atómicos causó la inseparabilidad del sujeto y el objeto en la interacción observacional.

De aquí partirá su teoría de las propiedades y de la medida, junto con su concepto de “fenómeno”: las propiedades, que estas imágenes descriptivas conllevan, no son propiedades del objeto en sí mismo con independencia de la observación, sino todo lo contrario, son propiedades fenoménicas en el sentido que, posteriormente, dará Bohr al término *fenómeno*, según el cual hay que tener en cuenta no sólo al objeto, sino también a nuestro proceso de observación en el que se incluye el dispositivo experimental; elementos éstos que se entrelazan y se vuelven inseparables en la teoría de Bohr⁷⁶, como ya expondré más adelante.

Ahora bien, ¿en qué sentido limitamos el uso de los conceptos clásicos? ¿y siguiendo qué criterio? Bohr buscó las respuestas a estas preguntas en el principio de correspondencia.

Durante la década de los años veinte, Bohr matizó este principio con la esperanza de que se encontrara una teoría que diera cuenta de los rasgos característicos de los fenómenos cuánticos, al tiempo que pudiera ser contemplada como una generalización de la física clásica, en concreto de la electrodinámica.

c) Segunda versión del principio de correspondencia

Cuando en 1925 se construyó la mecánica de matrices, Bohr vio en ella “la formulación precisa de las tendencias implícitas en el principio de correspondencia”.⁷⁷ Aquello que quiso decir Bohr con tal afirmación, acerca de que el formalismo matricial se podía considerar como una generalización del marco de las teorías clásicas, tal y como fue propuesto por el principio de correspondencia, es algo que tiene que ver más con la segunda versión que dio de este principio que con la idea original con la

⁷⁶ “The retention of the classical concepts in quantum theory implies that this theory is inconsistent with any framework which presupposes that the use of terms to describe the phenomenal appearances of objects requires that these objects possess properties corresponding to these terms even when they are not in an observational interaction. (...) But if the mathematical formalism provides a consistent and empirically confirmed representation, then, Bohr reasoned, that theory can be retained by reinterpreting its use of descriptive concepts in a new framework. This was Bohr's second great insight; it is the touchstone of all of his arguments in complementarity”. FOLSE, H., *The philosophy of Niels Bohr*, pp. 102-103.

⁷⁷ Cf. BOHR, N., “La teoría atómica y la mecánica” (1925), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, p. 94.

que nació⁷⁸, aunque en ella ya estaba implícita la causa del giro que da Bohr en su formulación.

De acuerdo con Murdoch⁷⁹, cuando Bohr afirma que la mecánica cuántica es una generalización de la mecánica clásica no se refiere a que la primera “contiene lógicamente” a la segunda, ya que las dos teorías son lógicamente incompatibles, debido a que la mecánica clásica presupone tácitamente que h es igual a cero, mientras que la mecánica cuántica presupone explícitamente que h es un número distinto de cero. De modo que, la mecánica clásica no es lógicamente derivable de la teoría cuántica, lo único derivable es una aproximación a la mecánica clásica en la región límite de los grandes números cuánticos, pero sin que se dé la identificación entre una y otra, pues ni siquiera aquí el postulado cuántico pierde su valor siempre distinto de cero.

Esto último era el foco central de la propuesta originaria del principio de correspondencia del que partió Bohr para matizar su punto de vista. Ahora dirá que la mecánica clásica es una *idealización* de las condiciones cuánticas en tanto que éstas quedaron fuera de la teoría clásica. No se trata de que ésta sea un caso límite de la mecánica cuántica porque, como ya he dicho, ni siquiera en el límite h es igual a cero, sólo *tiende* infinitamente a cero sin alcanzarlo nunca, sino más bien de un “caso límite analógico” o “asintótico” pero nunca exacto⁸⁰. De ahí que los resultados no sean idénticos, son sólo aproximativos, y si no son exactos estaremos obligados a tratar con probabilidades en los resultados y a utilizar datos estadísticos.

El nuevo principio de correspondencia propondrá analizar las condiciones que se dan en cada caso permitiendo el desarrollo de una teoría u otra. Según este principio, en el límite analógico estas condiciones se vuelven muy especiales y dan lugar a la física clásica y, aunque están fuera de las leyes que gobiernan el *mundo cuántico*, pueden considerarse como

⁷⁸ “The revised form of the Correspondence Principle, that is, was also connected with the conditions governing our use of concepts drawn from every experience”. HONNER, J., The description of nature. Niels Bohr and the Philosophy of Physics, p. 60.

⁷⁹ Cf. MURDOCH, D., Niels Bohr's Philosophy of Physics, p. 40.

⁸⁰ “No obstante, y a pesar de esta oposición, se ha logrado conectar el formalismo cuántico con las ideas clásicas en el caso límite en el que la diferencia relativa entre las propiedades de los estados estacionarios vecinos desaparece asintóticamente y en el que se puede hacer abstracción de las discontinuidades en las aplicaciones estadísticas”. BOHR, N., “El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica” (1927), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, p. 113.

un caso de posibilidad lógica fuera del límite cuántico, pero que ofrece un soporte conceptual desde el que poder seguir usando los conceptos clásicos dentro de la nueva teoría⁸¹.

Lo importante será tener en cuenta que la validez de este uso tiene su origen en esta “analogía” y no en una “representación pictórica” de la realidad. Éste será el único modo de evitar la ambigüedad conceptual de la física cuántica y conservar algo de significado físico en el esquema matemático: partir de esta dependencia asintótica de los conceptos con la realidad de nuestra experiencia ordinaria. Esta idea, acerca de cómo recuperar las nociones clásicas, va unida a la tesis de Bohr sobre la imprescindibilidad de los conceptos clásicos y de las condiciones para la comunicación inambigua, en la que profundizaré más adelante, ya que, con el uso inequívoco de los conceptos descriptivos, se alcanzan dos objetivos: recuperar el contenido intuitivo de la descripción con sentido físico y definir la objetividad desde el lenguaje, como inambigüedad de la información.

“Sin embargo, se puede regular el uso de estos conceptos, incluso fuera del dominio de validez de las teorías clásicas, postulando que la descripción cuántica coincide con el modo de descripción ordinaria en la región límite en la que se puede desprestigiar el cuanto de acción. Uno se esfuerza, pues, en la teoría cuántica para utilizar todos los conceptos clásicos dándoles una nueva interpretación que satisfaga este postulado sin entrar en contradicción con el principio de individualidad del cuanto de acción. Esto es lo que expresa el «principio de correspondencia»⁸².

Cuando Bohr acentuó este aspecto de inconmensurabilidad entre ambas teorías se dio cuenta de que el conflicto con la física clásica estaba en que ésta partía de una determinada concepción que no podía seguir vigente en la física cuántica y que, por tanto, era necesario asignarle las

⁸¹ “En realidad esta concordancia asintótica significa que es posible explicar el comportamiento de los electrones con la ayuda de imágenes mecánicas en el dominio de los números cuánticos grandes, dominio en el que la diferencia relativa entre estados estacionarios sucesivos llega a desaparecer en el límite. Sin embargo, debe subrayarse que en modo alguno se trata de un paso gradual a la teoría clásica en el curso del cual el postulado cuántico perdería su significado; al contrario, las conclusiones sacadas del principio de correspondencia con la ayuda de imágenes clásicas se obtienen justo conservando aun en ese límite el concepto de estado estacionario y los procesos individuales de transición”. BOHR, N., “El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría cuántica” (1927), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, p. 125.

⁸² BOHR, N., “La teoría atómica y los principios fundamentales de la descripción de la naturaleza” (1929), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, p. 149.

restricciones que la aparición de la discontinuidad requería⁸³. Esa concepción era precisamente el ideal clásico de la continuidad, el cual se revela falso a la luz del postulado cuántico, o al menos inexacto, y al que se le debe sustituir por el nuevo postulado, como punto de partida en la creación de un nuevo soporte conceptual para las nuevas leyes:

“La relación de correspondencia, además, proporciona el terreno para una explicación no sólo del fallo de la teoría reemplazada sino también de su limitado éxito.

Generalmente se puede explicar el fracaso de la teoría superada porque contiene, a menudo de forma tácita, una hipótesis ideal (idealización) que es falsa; ella ignora o construye equivocadamente algún factor importante del nuevo parámetro. T_2 revela el grado de idealización, tal como fue, de la anterior teoría T_1 . El limitado éxito de la teoría reemplazada puede explicarse usualmente siendo debido al hecho de que el factor que se ignoró es empíricamente negligible bajo ciertas condiciones.

La nueva teoría corrige a la anterior al exponer la falsedad de una de sus tácitas idealizaciones; es también más general en tanto que tiene (presumiblemente) menos ideales, hipótesis contrafactuales, que la precedente teoría, y también en tanto que sus resultados son aproximadamente correctos para un área de fenómenos más amplia que la de aquéllos de la teoría más vieja”⁸⁴.

Por tanto, el nuevo marco conceptual será una ampliación, y no sustitución, del marco clásico porque el primer término indica una cierta relación con el marco anterior y el segundo no; esa relación es la que determina el principio de correspondencia a través de la idea de *limitación* o *idealización*.

He aquí la razón por la cual no se destierra del todo a la noción clásica de continuidad, sólo de su lugar central, asignándole el lugar que le corresponderá dentro de las nuevas ideas: será desplazado a los suburbios de ese caso límite asintótico. Con lo cual Bohr podrá hablar del nuevo marco

⁸³ “En resumen, se puede decir que en su dominio de aplicación los conceptos de estado estacionario y de proceso individual de transición tienen tanta «realidad» o tan poca como la idea misma de partículas individuales. Igual en un caso que en el otro se trata de una expresión del principio de causalidad, complementario de la descripción espacio-temporal, cuyo uso lógico está únicamente restringido por las posibilidades limitadas de definición y de observación”. BOHR, N., “El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica” (1927), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, pp. 128-129.

⁸⁴ MURDOCH, D., Niels Bohr's Philosophy of Physics, p. 41.

conceptual como ampliación del anterior, y no como una simple sustitución: se sustituye el postulado fundamental, el principio de continuidad por el de discontinuidad, pero no se da una sustitución de todo el marco⁸⁵.

d) Conclusión. El camino hacia la complementariedad

El camino recorrido por Bohr antes de 1927, que le llevó a la complementariedad, se basó en el análisis de tres elementos, que consideró característicos del marco de las teorías clásicas y que he venido exponiendo hasta ahora:

1) En el nivel mesofísico, donde la interacción con el objeto es despreciable, es a través de la observación como se consigue dar una descripción espacio-temporal de los sistemas.

2) El ideal de la causalidad es lo que permite obtener una definición del estado del sistema sin necesidad de observarlo.

3) El supuesto de la continuidad en sus cambios de estado a través del tiempo hace posible la combinación de los dos modos de descripción anteriores.

Bohr se preguntó cómo afecta a los dos primeros el hecho de que el postulado cuántico negara el tercero al introducir la discontinuidad en los procesos energéticos. En un principio pensó que habría que renunciar al ideal de la causalidad, pues en la teoría de Bohr-Kramers-Slater renunció a la conservación estricta de la energía y el momento⁸⁶, con la finalidad de mantener el modelo continuo de campo electromagnético, en la descripción cuántica de los procesos atómicos, durante los intercambios de energía entre materia y radiación. Sin embargo, cuando los experimentos probaron que sí se conservaban, Bohr aceptó que la descripción causal a través de los principios de conservación debía mantenerse, al tiempo que esta aceptación llevó a Bohr, como se ha visto ya, a la renuncia inmediata del otro tipo de descripción, la espacio-temporal⁸⁷; pero, ¿por qué?

La razón es que Bohr vio claramente desde el principio que si se quería conseguir un marco apropiado y coherente para la descripción de los

⁸⁵ Continuaré el desarrollo de estas ideas en el próximo capítulo.

⁸⁶ Con lo cual estaba renunciando a la posibilidad de definir causalmente la evolución de los sistemas mecánicos, pues como se consigue esta definición causal es a través de la aplicación de los principios de conservación.

⁸⁷ Cf. BOHR, N., "La teoría atómica y la mecánica" (1925), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, pp. 80-81.

sistemas microfísicos, se debía sacrificar alguno de esos tres elementos de la descripción clásica⁸⁸. Aunque aquel primer intento de Bohr por conseguir una descripción mecánica, combinando la discontinuidad de los procesos cuánticos con la imagen de onda que ofrece el modelo de continuidad electromagnética, fracasó al tener que renunciar a la descripción espacio-temporal, Bohr seguirá buscando otros tipos de combinaciones para obtener tal descripción hasta que, por este camino, llegará a la idea de complementariedad.

Esta nueva vía que abrirá será a través del análisis del uso que se hace en la física clásica de los conceptos descriptivos, y cómo se ha de utilizar otro que armonice con el tipo de descripción que se puede dar en la física cuántica.

Durante el próximo capítulo se verá cómo culminó Bohr esta tarea epistemológica, que se propuso para resolver los problemas de conceptualización de la física cuántica, los cuales se reducen esencialmente a los dos siguientes, ya analizados. Uno es el *problema de la medida*, que consiste en cómo mantener la objetividad y completud de la descripción mecánica en la física cuántica. Otro es el *problema del contenido físico*: cómo atribuir este contenido, propio de las teorías clásicas, al formalismo cuántico sin recurrir a las imágenes visuales de la física clásica en el espacio y en el tiempo de nuestra percepción ordinaria.

Estos dos problemas se encierran en uno: el problema de la *dualidad onda-corpúsculo*, en el que habrá que salvar las paradojas conceptuales que su aceptación como tal dualidad implican. Ante este dilema, la actitud de Bohr fue plantear la coexistencia de dos tipos de continuidades⁸⁹, que dan dos aspectos diferentes a la cuestión del carácter dual de la Naturaleza:

1) El problema de la dualidad entre la continuidad electrodinámica y la discontinuidad es claramente, a mi modo de ver, el problema que enfrenta a la física clásica con la física cuántica.

2) En cambio, el dilema de la dualidad onda-partícula es un problema interno de la física cuántica, en tanto que se desarrolló dentro de sus esquemas matemáticos.

De tal manera que este planteamiento nos enfrentará con las siguientes preguntas: ¿cuál es la relación entre ambas continuidades? ¿En

⁸⁸ Cf. FOLSE, H., *The philosophy of Niels Bohr*, p. 75.

⁸⁹ Recuérdese que la continuidad electromagnética es la que utiliza el modelo de onda para la propagación de la radiación por el vacío, y la continuidad mecánica, o electrodinámica, se refiere más bien al modo continuo en el que evolucionan los sistemas físicos.

qué afecta cada una al ideal descriptivo clásico? ¿Cuál es su relación y su situación en el nuevo marco conceptual?

En el nivel físico-matemático, la física cuántica se independizó de la clásica cuando elaboró su propio formalismo teórico, y sólo se tuvo que enfrentar a la segunda dualidad⁹⁰. En cuanto a ésta, el problema físico del doble modelo corpuscular y ondulatorio, como un problema interno de la mecánica cuántica, desapareció del formalismo gracias, por un lado, a la interpretación de Born de “ondas de probabilidad”, y, por otro, a que Heisenberg, inducido por Bohr, relegó este problema al ámbito de la epistemología cuando prescindió de las magnitudes “no-observables” y renunció al uso de las imágenes visuales, negando que fuera un problema interno de la física cuántica, y afirmando que se trataba de una extrapolación ilícita de los conceptos clásicos en el seno de las ideas cuánticas⁹¹.

Sin embargo, al hacer esto rompió el puente entre la descripción matemática y la comprensión física de la Naturaleza. Por ello este puente se tuvo que buscar en el nivel conceptual del que la física, en especial la cuántica, no puede renegar sin renunciar a toda posibilidad de comprensión del mundo atómico, pues ella misma fue la que hizo recaer todo el peso de la comprensión en el nivel epistemológico, de modo que, sólo la búsqueda de un marco conceptual adecuado puede aportar a la teoría cuántica el contenido físico-intuitivo que le falta a su formalismo matemático. No obstante, en tanto que la física cuántica no se puede independizar de la clásica en el nivel epistemológico, se habrá de enfrentar a los problemas que suscitan ambas dualidades.

El acuerdo con la epistemología clásica es necesario porque fue ella la que consiguió lo que la física cuántica persigue: un significado físico para su formalismo matemático y la objetividad y completud de las descripciones de sus teorías. No se trata ya de un acuerdo con la teoría de la física clásica, como pretendió al principio con la dualidad entre lo continuo y lo discontinuo, sino de un acuerdo con su marco conceptual, el cual se buscará partiendo del segundo tipo de dualidad. Por consiguiente, el modo

⁹⁰ Éste fue el momento en que Bohr tuvo que renunciar al intento de combinar este tipo de dualidad a través de la Teoría de Bohr-Kramer-Slater.

⁹¹ De este modo, se consiguió un aparato matemático coherente y completo, que contiene y soluciona todas las cuestiones físicas relativas a los fenómenos cuánticos, sin tener que recurrir a reglas añadidas, y carente de contradicciones internas. Razón por la cual los físicos pueden utilizarlo para resolver situaciones concretas sin plantearse los problemas más profundos que lleva implícitos y que sólo se explicitan en el nivel conceptual.

en que Bohr intenta hacer compatibles a ambas dualidades tiene por objetivo el conseguir un cierto acuerdo con la epistemología de la física clásica: uso de conceptos clásicos para mantener el significado físico de la teoría, y la apelación a un uso moderado de los ideales clásicos referentes a la objetividad y completud de la descripción cuántica. Por ello insistirá tanto en que el nuevo marco conceptual es una ampliación y no una sustitución del clásico⁹².

Así pues, la solución de la paradójica dualidad onda-corpúsculo, a través de la idea de conservar un uso analógico de las nociones clásicas, le proporcionará un medio para salvar algo de la descripción espacio-temporal, desde la que se podrá buscar un cierto contenido físico para la teoría cuántica.

Pero, en cuanto al problema de la dualidad entre lo continuo y lo discontinuo, en el nivel epistemológico, es algo que guarda más relación con el problema de la descripción clásica; es decir con el ideal de objetividad y de causalidad.

La razón que veo para lanzar tal afirmación es que fue el postulado de la continuidad lo que permitió a las teorías clásicas mantener tales ideales, del mismo modo que la discontinuidad cuántica acaba con tal posibilidad. Consecuentemente con la solución de este otro problema, consiguió mantener una cierta objetividad y completud en la descripción cuántica, atribuyendo un nuevo significado al concepto de objetividad por medio de una revisión de la noción de observación y de medición.

⁹² “En realidad, la continuidad espacial de nuestra imagen de la propagación de la luz y la atomicidad de los efectos luminosos son aspectos complementarios en el sentido de que explican características igualmente importantes de los fenómenos luminosos, que no pueden ponerse en contradicción directa entre sí, porque un análisis más íntimo de las mismas desde el punto de vista mecánico requiere utilizar dispositivos experimentales que se excluyen mutuamente. Al mismo tiempo, esta situación real nos obliga a renunciar a una explicación causal rigurosa de los fenómenos luminosos y a contentarnos con leyes de probabilidad basadas en el hecho de que la descripción electromagnética de la transferencia de energía se conserva válida en sentido estadístico. Esto constituye una aplicación típica del llamado principio de correspondencia, y que alude al intento de utilizar hasta el máximo los conceptos de las teorías clásicas de la mecánica y de la electrodinámica, no obstante la contradicción existente entre estas teorías y el cuanto de acción.

Al principio tal situación puede parecer incómoda; pero, como ha sucedido frecuentemente en la ciencia, cuando nuevos descubrimientos han puesto de manifiesto limitaciones fundamentales de los conceptos considerados hasta entonces como indispensables, nos encontramos recompensados por haber alcanzado una visión más amplia y una mayor capacidad para correlacionar fenómenos que anteriormente pudieran haber parecido hasta contradictorios”. BOHR, N., “Luz y vida” (1932), en: Física atómica y conocimiento humano, pp. 7-8.

Estas ideas las desarrollaré en el próximo capítulo, donde examinaré la forma en que Bohr conjuga ambas exigencias físicas en una única descripción, la descripción exhaustiva de los fenómenos complementarios, y quizás ésta sea la razón de que Bohr diera dos formulaciones de la complementariedad: entre las nociones de onda y de corpúsculo, y entre las descripciones causal y espacio-temporal. Sin embargo, antes de pasar al cuarto capítulo, insisteré en lo siguiente, que la nueva forma de relacionar y de usar los conceptos, a la que acabo de referirme, ha de cumplir un requisito fundamental: estas relaciones han de aportar un uso inambiguo como condición de la objetividad en la descripción de los fenómenos cuánticos.

La complementariedad surgirá a partir de este estudio, es decir, de cómo han de ser estas relaciones, porque, al establecer las condiciones bajo las cuales pueden usarse de forma inambigua los conceptos clásicos para describir los fenómenos cuánticos, será cuando Bohr descubra que las paradojas se disuelven si estas relaciones se conciben como de mutua exclusión y de reciprocidad complementaria.

Ahora bien, esta nueva concepción de las relaciones implica todo un nuevo marco en el que se han de reinterpretar todos los conceptos y nociones fundamentales de la física y dicha tarea supone un gran esfuerzo epistemológico, donde se han de proponer y elaborar cambios radicales en la manera tradicional que la ciencia tenía de entender, aprehender y describir esa porción de realidad, que constituye su área de trabajo y campo de estudio.

CAPÍTULO IV:

«BOHR: LA FILOSOFÍA DE LA COMPLEMENTARIEDAD Y SU LECCIÓN EPISTEMOLÓGICA»

El 16 de septiembre de 1927 en la ciudad italiana de Como se celebró el Congreso Internacional de Física, donde Bohr expuso por primera vez en público su interpretación de la física cuántica basada en la idea de la complementariedad¹. Desde este nuevo marco conceptual Bohr pretende disolver las paradojas y problemas, analizados en el capítulo anterior, por la vía de la epistemología, apostando por un cambio en nuestro modo de conceptualizar la experiencia antes que ofrecer una solución física encajable en los hábitos de pensamiento clásicos, tradicionalmente admitidos por nuestro sentido común.

En tanto que el resto de los físicos buscaban una salida a estos problemas refugiándose pragmáticamente en las matemáticas, o promoviendo alternativas físicas, pero que no acababan nunca de convencer, la propuesta epistemológica de Bohr les pareció tan incomprensible y polémica como la propia teoría a la que pretendía dar una explicación.

Este capítulo se centra en exponer en qué consiste la solución que ofreció Bohr al conflicto de la física cuántica con la física clásica.

4.1) Las Dos Formulaciones de la Complementariedad

Bohr sostuvo que el postulado cuántico, es decir, la discontinuidad de la Naturaleza, da lugar a dos tipos de complementariedad, y en un principio parece que contempló la dualidad cinemático-dinámica como una consecuencia de la dualidad onda-corpúsculo². Ambas formulaciones son

¹ Ésta es su famosa Conferencia de Como, que volvió a exponer en Bruselas el 29 de octubre del mismo año en la Quinta Conferencia Solvay. Esta conferencia está publicada en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, con el título “El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica”.

² La razón de esto es que, ahí donde aparece el problema de la dualidad, las magnitudes dinámicas y cinemáticas se vuelven incompatibles.

los dos modos diferentes de complementariedad que Bohr propone explícitamente en el dominio de la física. Pero, además, la complementariedad implica un punto de vista más general en tanto que se refiere al modo cómo se han de relacionar nuestros conceptos y las experiencias físicas a la hora de dar una descripción de la Naturaleza. Esto es, la complementariedad es el nuevo marco conceptual, entendiendo por marco conceptual “la representación lógica no ambigua de relaciones entre hechos de la experiencia”³; esta interrelación es la que gobierna la aplicabilidad de los conceptos a las situaciones empíricas.

a) El significado de la complementariedad como el nuevo marco conceptual

Comenzaré diciendo que la característica más general que tiene la complementariedad, como marco conceptual, es el carácter paradójico de su relación con el marco clásico: si bien el tratamiento clásico de los conceptos es sustituido por el de la física cuántica, ésta necesita recurrir a la terminología clásica.

“Es verdad que hay una relación paradójica entre el planteamiento cuántico y el clásico: uno suplanta al otro, aunque la física cuántica requiere la terminología clásica para proceder. Y también es cierto que Bohr se deleitó con esta paradoja: “Es casi la esencia de un experimento que las observaciones puedan ser descritas con los conceptos de la física clásica. Esto es la paradoja completa de la teoría cuántica”⁴.

Esta “sustitución” incompleta es la que dio lugar a la propuesta de la “generalización”, como ya mencioné antes, y es lo que le da a la complementariedad la peculiaridad de la que carece el sentido más habitual del término, según el cual basta con que dos puntos de vista o perspectivas

³ BOHR, N., “Unidad del conocimiento” (1954), en: Física atómica y conocimiento humano, p. 84.

⁴ HONNER, J., The description of nature, p. 58. (La cita que incluye es de Bohr aunque citado a su vez por Heisenberg en Physics and Beyond -London, Allen and Unwin, 1971-, p. 129). Y también en MURDOCH, D., Niels Bohr's Philosophy of Physics, p. 59: “... The essence of Bohr's conception of complementarity: the classical physical concepts are indispensable for the theoretical interpretation of experimental data, and yet are subject to certain limitations on their use in the quantum theory”.

sean diferentes lados o aspectos de lo mismo para ser complementarios⁵. La complementariedad de la que habla Bohr no son “modos de ver” con los que el científico mira la Naturaleza, sino más bien son diferentes aspectos de ésta, o del fenómeno, que se presentan a nuestro conocimiento, aspectos que, además de complementarse, se excluyen.

De tal manera esto es así, que la idea de complementariedad no tiene sentido si no se considera el nuevo marco conceptual como una ampliación, o generalización, del marco de la causalidad, pues el objetivo con el que nació el primero fue el de dar cabida dentro del mismo esquema de pensamiento tanto a los fenómenos cuánticos como a los clásicos, hacerlos compatibles y no sustituir unos por otros.

A este respecto Bohr dice que el término “complementariedad” es apropiado “para recordarnos que si la teoría cuántica aparece como una generalización natural de las teorías físicas clásicas es gracias a la combinación que existe entre caracteres que estaban unidos en el modo clásico de descripción pero que aparecen separados en la teoría cuántica”⁶. Así, si el marco de la complementariedad no pretendiera ser una ampliación en la que tuvieran su lugar ambos tipos de fenómenos y de descripciones, no se hubiese necesitado introducir esta noción de “complementario”, pues no habría nada que se excluyera entre sí, y, por tanto, nada que complementar.

Por otro lado, la complementariedad tampoco es una dialéctica, pues no requiere el último paso hacia una síntesis⁷, ya que, si consideramos como tesis y antítesis⁸ los dos tipos de descripción, no hay un tercer tipo de

⁵ Es la distinción que propone Drieschner entre complementariedad “débil”, la más habitual, y “fuerte”, a la que Bohr se refiere en tanto que esos aspectos son completamente contrarios e irreducibles entre sí, esto es, son mutuamente excluyentes, y no sólo diferentes modos de ver el mismo objeto. Cf. HONNER, J., The descripción of nature, p. 59.

⁶ BOHR, N., “Introducción” (1929), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, p. 66.

⁷ “Una información completa y exhaustiva obliga a armonizar elementos que desbordan el marco del espacio lógico leibniziano. Sin llegar a ser un pensamiento dialéctico, puesto que aquí no hay propiamente un momento de síntesis, a lo que sí se está renunciando es a un criterio cartesiano de claridad que hace residir ésta en lo simple. La claridad ha de buscarse en lo complejo, pero ello no se obtiene por mera adición de lo simple sino por combinación de lo complejo”. RIOJA, A., “La filosofía de la complementariedad y la descripción objetiva de la naturaleza”, p. 272.

⁸ En tanto que tales descripciones se caracterizan por su mutua exclusión o incompatibilidad, tanto lógica como empírica, se pueden pensar como opuestas lógicamente por una relación antitética.

descripción, esencialmente diferente de las dos primeras, a la que llegar por la combinación de estas dos: la descripción complementaria es la *forma* en que se vuelven complementarias y, por tanto, compatibles, las mismas descripciones que se han revelado excluyentes con la introducción de la discontinuidad⁹. Lo que sí hay es una integración de ambas, aunque sólo en el sentido de una yuxtaposición, y no a modo de una fusión entre sí.

De ahí que la *descripción complementaria*¹⁰ sea completa y exhaustiva, ya que uno de los factores que determinan el significado de la complementariedad establece que esto sea precisamente así, es decir, que ambos tipos de descripción son necesarios para dar una descripción rigurosa de la totalidad del sistema atómico. Es en este sentido desde el que se ha de buscar la base del significado que Bohr atribuye al término de “generalización”, pues el objetivo prioritario de la generalización del marco es integrar todos los elementos necesarios para una descripción objetiva y completa, tanto si son de la física clásica como de la teoría cuántica, tanto si son compatibles como incompatibles¹¹.

En cuanto a la forma de cómo conseguir esto, recuérdese que Bohr la busca presentando los modos de descripción clásicos como idealizaciones inadecuadas en el dominio atómico, el cual exige un marco conceptual más amplio en el que estas idealizaciones sean sustituidas por otro uso más limitado de las descripciones. En otras palabras, mientras que el marco clásico se ha revelado demasiado “estrecho” para recoger en él los fenómenos cuánticos, el uso que este marco propone de las descripciones es demasiado “amplio”, en el sentido de que no está debidamente delimitado por las condiciones adecuadas que sí contemplará el nuevo marco más restringido¹².

⁹ Esto es, la descripción complementaria es el tipo de descripción completa que puede ofrecer la física cuántica.

¹⁰ Así la denomina Bohr, “descripción complementaria”, en: BOHR, N., “Discusión con Einstein sobre problemas epistemológicos de la física atómica” (1949), en: Física atómica y conocimiento humano, p. 50.

¹¹ A esto mismo me referí en el capítulo anterior cuando propuse que la generalización no es una sustitución.

¹² Aunque a la vez más amplio, desde otro punto de vista, porque esas mismas restricciones ofrecen la posibilidad de ensanchar el área de la experiencia física, incluyendo fenómenos clásicos y cuánticos: “... cuando nuevos descubrimientos han puesto de manifiesto limitaciones fundamentales de los conceptos considerados hasta entonces como indispensables, nos encontramos recompensados por haber alcanzado una visión más amplia y una mayor capacidad para correlacionar fenómenos que anteriormente pudieran haber parecido hasta

La idea básica de la tesis de Bohr es que, a pesar de la inadecuación de los conceptos clásicos en física cuántica, son indispensables; sin embargo, han de cumplir las condiciones restrictivas que impone el postulado de la indivisibilidad del cuanto de acción¹³: *“sólo podemos usarlos dentro de los límites circunscritos por el cuanto de acción -más allá de estos límites los conceptos clásicos cesan de estar bien definidos. Esta idea originó en su tesis que la estructura de la teoría cuántica es en un sentido una generalización del esquema conceptual de la mecánica clásica; y esta tesis fue un corolario del principio de correspondencia”*¹⁴.

Así, Bohr consideró ambos tipos de complementariedad como consecuencias de la generalización que la teoría cuántica hace de la mecánica clásica: a su vez, esta generalización suponía una integración complementaria de ambos marcos conceptuales, en la que las nociones de continuidad clásica y discontinuidad cuántica se vuelven “recíprocamente complementarias”, dando lugar a la vinculación entre la continuidad y discontinuidad que buscaba Bohr para disolver el conflicto entre la teoría clásica y cuántica.

Es a este tipo de complementariedad, más general que las dos formulaciones que explícitamente dio Bohr, al que posiblemente se refiera Weizsäcker cuando habla de “complementariedad circular” frente a las “complementariedades paralelas” de aquéllas otras dos¹⁵. Weizsäcker parte de la distinción entre la formulación de Pauli, en la que se relacionan la posición y el momento, y la formulación original de Bohr entre la descripción espacio-temporal y la causal (a la que prefiere aludir como “función de Schrödinger” porque es esta función la que ofrece las predicciones causales estadísticas), y llamará “complementariedad circular” a esta última porque, cuando observamos el sistema con objeto de describirlo espacio-temporalmente, se produce el colapso de la función de onda, cuyo colapso implica que se han destruido las posibilidades de predicción causal, por tanto son mutuamente excluyentes, y, además, son nociones que nunca marcharon juntas en ningún modelo clásico porque la última es, propiamente, cuántica.

contradictorios”. BOHR, N., “Luz y vida” (1932), en: Física atómica y conocimiento humano, p. 8; ver también: pp. 31 y 85-86.

¹³ Cf. BOHR, N., La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, pp. 58 y 135; y también en: Física atómica y conocimiento humano, pp. 22, 41 y 88.

¹⁴ MURDOCH, D., Niels Bohr's Philosophy of Physics, p. 57.

¹⁵ Cf. WEIZSÄCKER, C.F., La imagen física del mundo, “Complementariedad y lógica”, p. 298; también: JAMMER, M., The Philosophy of Quantum Mechanics, pp. 102-103; y HONNER, J., The description of nature, p. 58.

La razón que me mueve a vincularla a una complementariedad entre la continuidad y la discontinuidad es que aquéllas nociones no sólo no se vinculan en ningún modelo clásico, sino que cada una simboliza las características propias de la teoría clásica y la teoría cuántica.

Pero volviendo a las ideas de Bohr, por un lado, en relación con la primera, la generalización de los modelos clásicos de onda y partícula supuso la aparición y el uso de los modelos no-estándar, que analizaré más adelante. Por otro lado, en cuanto a la de los conceptos cinemáticos y dinámicos, aquélla supuso su desvinculación en tanto que:

“Los conceptos que en la teoría menos general marchan juntos, por así decirlo, se ven separados en la teoría más general. La noción clásica de exacta simultaneidad de la posición y el momento es, pensó, una idealización, en el sentido de que es aplicable, no universalmente, sino únicamente bajo condiciones especiales: donde la discontinuidad aparece, esta noción, como la noción clásica de partícula, cesa de estar bien definida”¹⁶.

b) Los dos componentes básicos de la noción de complementariedad

Pasaré ahora a exponer algunas de las definiciones que dio Bohr de complementariedad, aunque más que definiciones son diversas caracterizaciones, en las que va revelando en cada una los aspectos fundamentales, o requisitos, que han de estar presentes para que algo pueda ser considerado complementario dentro de la filosofía de Bohr¹⁷.

1) La descripción complementaria abarca toda la información inambigua, acerca del mismo objeto atómico, que se puede obtener bajo diferentes condiciones experimentales, mutuamente excluyentes, y descrita con ayuda de los conceptos clásicos¹⁸.

¹⁶ MURDOCH, D., Niels Bohr's Philosophy of Physics, p. 57.

¹⁷ Podría decirse también que las siguientes definiciones forman parte de la intensión del concepto de complementariedad, dentro del contexto de las “teorías referencialistas” en las que me detendré más adelante.

¹⁸ Cf. BOHR, N., Física atómica y conocimiento humano, pp. 32-33, 49 y 122.

2) Otra de las características de las descripciones complementarias es que “sólo juntas constituyen una generalización natural del modo de descripción clásico”.¹⁹

3) La noción de complementariedad también pone de relieve la indispensabilidad de los conceptos clásicos en teoría cuántica junto con su limitada aplicabilidad²⁰.

4) “... la noción de complementariedad sirve para simbolizar la limitación fundamental con que se tropieza en física atómica de la existencia objetiva de fenómenos independientes de los medios de observación”²¹.

5) En otra de estas caracterizaciones, la más cercana a lo que debería ser una definición²², Bohr describe así la descripción complementaria: “*en ella toda aplicación de los conceptos clásicos excluye el uso simultáneo de otros conceptos clásicos igualmente necesarios en otras circunstancias para la elucidación de los fenómenos*”²³. Por tanto, la descripción complementaria es aquella que establece una relación de mutua exclusión entre los conceptos clásicos cuando los aplicamos a los objetos atómicos, de modo que su uso simultáneo (sincrónico) no es posible, pero sí su uso “alternativo” (diacrónico) bajo otras condiciones diferentes, el cual además es necesario para comprender el fenómeno en su totalidad.

¹⁹ BOHR, N., “El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica” (1927), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, p. 102. Y en la p. 24 de Física atómica y conocimiento humano: “Este punto de vista de la *complementariedad* no significa, en modo alguno, una renuncia arbitraria a un análisis detallado de los fenómenos atómicos, sino que, por el contrario, es la expresión de una síntesis racional de toda la experiencia acumulada en este campo, experiencia que sobrepasa los límites entre los cuales el ideal de causalidad encuentra sus posibilidades naturales de aplicación”. También en la p. 92: “... la descripción complementaria de la física cuántica representa para nosotros una nueva generalización lógica que permite la inclusión de leyes decisivas para la explicación de las propiedades fundamentales de la materia y que a la vez se salen del dominio de la descripción determinista”.

²⁰ Cf. BOHR, N., “Discusión con Einstein sobre problemas epistemológicos de la física atómica” (1949), en: Física atómica y conocimiento humano, p. 49.

²¹ BOHR, N., “Luz y vida” (1932), en: Física atómica y conocimiento humano, p. 10; ver también la página 79.

²² Bohr nunca se preocupó de dar una definición precisa y, quizás, la razón de esto sea, como Heisenberg sugiere, el mantenerse fiel a la flexibilidad que el formalismo cuántico y la idea de complementariedad imponen a la nueva física. Cf. HEISENBERG, W., “Remarks on the Origin of the Relations of Uncertainty”, p. 6.

²³ BOHR, N., “Introducción” (1929), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, p. 59.

Dada esta relación de mutua exclusión, durante algún tiempo prefirió usar el término *reciprocidad* en lugar de *complementariedad* para denotar la relación exclusión mutua, pero lo abandonó porque: “*la palabra «reciprocidad» podría inducir a error, ya que las teorías clásicas la emplean a menudo en un sentido por completo diferente. El término «complementariedad», que se usa ya de ordinario, parece quizás mejor apropiado para recordarnos que si la teoría cuántica aparece como una generalización natural de las teorías físicas clásicas es gracias a la combinación que existe entre caracteres que estaban unidos en el modo clásico de descripción pero que aparecen separados en la teoría cuántica*”²⁴.

De estas definiciones se pueden extraer las características²⁵ y los dos factores determinantes de la noción de complementariedad. De momento me ocuparé de estos dos rasgos fundamentales, que determinan cuándo dos conceptos o proposiciones son complementarios. Por un lado, la noción de “mutua exclusión”, cuando los dos conceptos son empírica o lógicamente incompatibles; por otro, la noción de “mutuo complemento”, en el sentido de que ambos conceptos conjuntamente constituyen los requisitos para una descripción completa, es decir, ambos son necesarios para poder agotar toda la información acerca del sistema atómico.

Heisenberg apunta la importancia de estos dos elementos en la postura que mantuvo Bohr durante sus discusiones sobre la interpretación física del formalismo matemático de la nueva teoría:

“En el centro de sus reflexiones estaba el concepto de complementariedad -por él recién acuñado-, cuya función era describir una situación en la cual podemos conocer el mismo suceso bajo dos aspectos distintos. Aunque estos dos aspectos se excluyan mutuamente también se complementan, y sólo por la yuxtaposición de ambos aspectos opuestos se agota totalmente el contenido intuitivo del fenómeno”²⁶.

²⁴ *Ibid*, p. 66.

²⁵ Estas características son: 1) ser una ampliación o generalización del marco conceptual; 2) ofrecer una descripción completa y objetiva; 3) imponer una limitación, o restricción, al uso de los conceptos clásicos; 4) dotar de contenido físico al formalismo matemático. Con las tres primeras características Bohr consigue que el marco de la complementariedad alcance el objetivo primordial de la cuarta característica y establecer, así, un puente entre teoría y experiencia, entre el lenguaje matemático y la realidad física, con lo cual salva el ideal descriptivo y explicativo de la ciencia moderna y escapa del instrumentalismo científico, donde la descripción física se reduce a la descripción matemática con el único valor de servir como herramienta de predicción.

²⁶ HEISENBERG, W., “Penetrando en tierra nueva”, en: Diálogos sobre física atómica, p. 100.

Estas dos ideas, conjuntamente, componen el significado de ambas formulaciones: tanto de la complementariedad de los conceptos de onda y partícula como de la complementariedad de las descripciones dinámicas y cinemáticas. Porque, como analizaré a continuación, ambas están implícitas tanto en el dilema de la dualidad onda-corpúsculo, del que partió Bohr, como en el principio de indeterminación de Heisenberg.

c) Complementariedad de las imágenes de onda y corpúsculo

Como ya dije, hasta el otoño de 1926, Bohr consideró los modelos de onda y de partícula, para la materia y la radiación, respectivamente, como modelos formales o heurísticos, sin ningún sentido físico o valor real. Sin embargo, en el invierno de 1926 a 1927 su actitud ante este problema cambió²⁷: ahora ve la dualidad como un problema real de la propia descripción de la Naturaleza; de ahí que considere indispensables a ambos modelos para la interpretación de los datos experimentales, ya que se necesitan los dos para describir todas las situaciones, de forma que, cuando uno falla se debe emplear el otro.

La primera formulación de la complementariedad servirá para resolver el dilema de la dualidad onda-corpúsculo y disolver su inconsistencia, y con ello salvar algo de la validez de las imágenes clásicas. En la medida en que el dilema de la dualidad se disolvería rechazando la idea de que el objeto de la teoría física es dar una descripción de los objetos reales, la tarea que se propuso Bohr de resolver esto de otra forma demuestra que las acusaciones de instrumentalista que recayeron sobre él no tienen fundamento²⁸.

Este cambio afectó a sus reflexiones acerca del problema de reconciliar la continuidad con la discontinuidad. Desde su nuevo modo de ver el problema, considerará la continuidad clásica y la discontinuidad

²⁷ Recordaré que la razón de este cambio fueron los acontecimientos que se produjeron entre 1925 y 1927: el fracaso de la teoría de Bohr-Kramers-Slater, el desarrollo de la mecánica ondulatoria, a partir de la idea de de Broglie, y la prueba experimental de la difracción de los electrones.

²⁸ Cf. FOLSE, H., The Philosophy of Niels Bohr, p. 84. En la página 86, Folse llega a esta conclusión: "Thus what was needed was not a victory for the particle picture or the wave picture, but rather an explanation of how the apparent contradiction involved in this dualism resulted from a misunderstanding of how these concepts relate to the systems they are used to represent".

cuántica como mutuamente excluyentes²⁹. Bohr se dio cuenta de que los modelos clásicos de onda y partícula “*presuponían un comportamiento espacio-temporal continuo, lo cual está, por ejemplo, implícito en el concepto clásico de partícula, la cual tiene una trayectoria espacio-temporal continua*”. Además, apuntó que todas las palabras de nuestro lenguaje, en general, se basan en la continuidad “*en el sentido de que la continuidad es un presupuesto de la conceptualización de toda experiencia*”³⁰.

De tal forma que estos conceptos tienen un significado inambiguo en el marco clásico porque éste se basa en la continuidad. De ahí que Murdoch llame *modelos estándar* al uso que se hace de ellos en el contexto de la física clásica, el cual permite hacer afirmaciones como “tal cosa es una partícula” o “tal otra es una onda” de manera inambigua.

No obstante, sus reflexiones no quedaron aquí, también advirtió que si bien este uso clásico se vuelve ambiguo cuando la continuidad falla, el hecho de partir de la discontinuidad, como el nuevo supuesto que sustituye al anterior³¹, abre la posibilidad de emplear inequívocamente estos modelos de otra forma, es decir, con un significado y un uso distintos de los que tenían en el marco clásico, convirtiéndose en los modelos no-estándar. Estos modelos son el de onda material, y el de partícula para la radiación, los cuales surgieron de la discontinuidad de h en la fórmula de Einstein para el fotón y en la de de Broglie para calcular las ondas de materia.

“La postura de Bohr ahora fue que cuando se obtiene la continuidad, los modelos estándar son aplicables, es decir, la materia puede ser concebida como corpuscular y la radiación como ondulatoria; no obstante, cuando la discontinuidad prevalece, los modelos estándar fallan, ya que ellos presuponen la continuidad, y entonces surgen los modelos no-estándar. Aunque no haya un único modelo totalmente adecuado para la materia y la radiación, y ninguna interpretación sencilla que se pueda comprender de la mecánica cuántica, sí hay una interpretación parcialmente adecuada para cada aplicación de la teoría.

²⁹ Cf. BORH, N., “La teoría atómica y los principios fundamentales de la descripción de la naturaleza” (1929), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, p. 143; y también: “Luz y vida” (1932), en: Física atómica y conocimiento humano, p. 7.

³⁰ Cf. MURDOCH, D., Niels Bohr's Philosophy of Physics, pp. 44-46.

³¹ Esta idea es la que propone la lección epistemológica, tal y como se podrá comprobar más adelante.

Dada la situación teórica de ese momento³², ésta fue una razonable y cauta aproximación al problema de la interpretación³³.

Por consiguiente, si el marco clásico descansaba sobre la idea de continuidad y el marco cuántico parte de la discontinuidad, es fácil considerar la complementariedad como una ampliación del marco de la causalidad por englobar a éste como una abstracción del primero, cuya aplicación está limitada al área restringida de las idealizaciones respecto de los fenómenos cuánticos³⁴. En este sentido la continuidad clásica y la discontinuidad cuántica también se muestran mutuamente excluyentes en el marco más amplio de la complementariedad, siendo esta relación de “reciprocidad complementaria” lo que las vincula en el nuevo esquema conceptual de la física cuántica.

La ventaja más notable que este punto de vista ofrece es no tener que prescindir de los conceptos clásicos, ni buscar otros como sustitutos, bastará con cambiar el uso que hacemos de ellos para poder preservar un significado bien definido. Este cambio se produce mediante una adecuada aplicación de ellos, carente de la ambigüedad a la que conduce el uso clásico, cuando los referimos a los objetos atómicos teniendo en cuenta que en ellos ha aparecido la dualidad onda-corpúsculo a través de los modelos no-estándar. En otras palabras, lo que se cambiará será el *tipo de relaciones lógicas* que mantienen entre sí dentro de los marcos conceptuales de la física.

Hubo un momento en que Bohr pensó que era aconsejable el uso de ambos modelos, tanto para la radiación como para la materia, más adelante los consideró indispensables para dar una explicación física del principio de incertidumbre y, en general, de la mecánica cuántica. Aquello que le permitió encajar en su argumentación este dilema³⁵ coherentemente con la idea de que son imprescindibles fue su propuesta de que tales modelos son

³² Poco antes de que Heisenberg enunciara las relaciones de incertidumbre.

³³ MURDOCH, D., Niels Bohr's Philosophy of Physics, p. 46.

³⁴ “En este aspecto, la mecánica cuántica representa una generalización coherente de la descripción mecánica determinista, a la cual comprende, por otra parte, como un límite asintótico en el caso de fenómenos físicos cuya escala es suficientemente grande para permitir despreciar el cuanto de acción”. BOHR, N., “Unidad del conocimiento” (1954), en: Física atómica y conocimiento humano, p. 91.

³⁵ La dualidad onda-corpúsculo le había obligado a admitir que ambos modelos son indispensables para describir las situaciones experimentales, de forma que, cuando uno falla se puede, y se debe, emplear el otro.

complementarios en el sentido de que se excluyen mutuamente³⁶. Es más, diré que aquello que le permite tal cosa es el *nivel empírico* en el que se desenvuelve la dualidad.

Murdoch distingue entre dos niveles de la dualidad: uno es el nivel formal del esquema matemático, cuya interpretación puede darse en términos de ondas y de partículas; ésta “dualidad formal” es la que se da en las fórmulas de Planck-Einstein-de Broglie, pero que desapareció del formalismo matemático de la física cuántica cuando se construyeron la mecánica de matrices y la mecánica ondulatoria. El otro es empírico, donde determinados experimentos (por ejemplo en los que aparece el efecto Compton) reclaman el modelo de partícula, y otros como el fenómeno de interferencias apela únicamente al modelo de onda; en este nivel se da la “dualidad empírica”³⁷.

Pero el *nivel formal* también es importante, ya que él fue el que introdujo el dilema de manera irreductible a uno de los términos, estableciendo la indispensabilidad de ambos, de las nociones clásicas, aunque no en sentido clásico (modelos estándar), sino más bien en un sentido menos definido, y considerado ambiguo en el contexto clásico (modelos no-estándar), pero que adquieren un sentido inequívoco en el contexto complementario de la relación de mutua exclusión.

Desde este sentido empírico de la dualidad es de donde Bohr deriva la equivocidad que padecen las nociones clásicas; es decir, la ambigüedad surge cuando usamos en el nivel cuántico los modelos estándar de onda y partícula. Sin embargo, ésta desaparece en el nivel formal, donde los modelos se usan de manera no-estándar, a pesar de que no se pueda recuperar su precisión clásica.

Ésta es la razón de que sea en el nivel formal desde el que brote la consecuencia de que no puede haber más modelos visuales, porque ambos modelos están *sincronizados* en las fórmulas de tal forma que su integración nos incapacita para dar la imagen única y bien definida que exige una representación pictórica de la realidad. La diacronía del nivel empírico hace desaparecer cualquier inconsistencia por expresar una

³⁶ Cf. MURDOCH, D., *Niels Bohr's Philosophy of Physics*, pp. 53-54.

³⁷ Cf. *Ibid*, p. 62. En tanto que la primera es la que aparece en el formalismo matemático y la segunda hace referencia al conflicto entre el modelo clásico para la radiación y el modelo discreto de la teoría cuántica, esta distinción entre dualidad formal y dualidad empírica puede considerarse similar a mi distinción anterior entre la dualidad de las nociones de onda y partícula y la dualidad del modelo clásico de continuidad y del modelo de discontinuidad cuántica. La dualidad formal es propia de los modelos no-estándar donde se da su unión (onda-corpúsculo); la dualidad empírica es propia de los modelos estándar, donde lo continuo y lo discontinuo están claramente separados.

relación de exclusión o de incompatibilidad no cuántica sino clásica, la cual se vuelve compatible en el nivel formal a cambio de perder sus características de modelos estándar, con todas las consecuencias que esto conlleva. De este modo, la diacronía y la incompatibilidad se convierten en sincronía cuando se considera la totalidad de las situaciones experimentales; pero, esta sincronía de ambos modelos es la que demanda el nivel formal, en la que los dos aspectos de los fenómenos ya están integrados en las fórmulas de Planck-Einstein-de Broglie, convirtiéndolos en modelos no-estándar, los cuales se vuelven compatibles a cambio de hacer una concesión a la función de visualizar o representar los objetos.

Por ello puede afirmarse que la integridad del nivel formal de la dualidad es la que da lugar a la noción de “complemento mutuo”, mientras que la de “mutua exclusión” está implícita en el nivel empírico de la dualidad, en el que se da una especie de desdoblamiento³⁸ de la integridad formal. En tanto que Bohr hace explícita esta relación de mutua exclusión a partir del principio de incertidumbre³⁹, esta idea acerca de que la dualidad empírica ofrece tal relación apoya la imprescindibilidad de la complementariedad onda-corpúsculo en la argumentación de Bohr. Además, si se tiene en cuenta que Bohr basó su búsqueda del contenido físico en el problema de la dualidad y que se apoyó en ella, sobre todo entre la continuidad y la discontinuidad, para justificar la ampliación del marco conceptual, no puede renunciarse a esta complementariedad sin destruir su edificación epistemológica, pues es a partir de ésta desde donde propone un nuevo uso para los modelos clásicos; es decir, de aquí es desde donde Bohr buscará salvar la aplicabilidad de la descripción espacio-temporal, en la que se basan los modelos clásicos, sin aludir a nada visual.

³⁸ Un desdoblamiento que habrá que volver a integrar en la totalidad del fenómeno, si es que buscamos dar una descripción complementaria y completa de éste, en la que se incluyan todas las situaciones experimentales.

³⁹ Murdoch establece aquí otra distinción, esta vez entre el tipo de relación de exclusión que mantienen entre sí los conceptos de ambas formulaciones de la complementariedad: “Concepts may be mutually exclusive in a logical sense, in so far as they are logically or conceptually, incompatible (as e.g. the concepts of wave and particle) or in an empirical or epistemic sense, in that they cannot be known through sense perception to be applicable to a thing at the same time (as for example kinematic and dynamic attributes in quantum mechanics)”. MURDOCH, D., *Niels Bohr's Philosophy of Physics*, p. 61. Sin embargo, esta exclusión lógica es la incompatibilidad clásica que he mencionado, porque no son incompatibles en el esquema matemático de la teoría cuántica, lo único incompatible en él son las propiedades cinemáticas y dinámicas, esto es lo que Murdoch ha llamado “exclusión empírica”. Aceptar el primer tipo de exclusión exige precisar que se trata de la incompatibilidad de aquellas nociones que se da en el dominio clásico como modelos estándar, pero no en el cuántico.

Razón por la cual, la crítica de Murdoch a la complementariedad de onda y partícula⁴⁰ es demasiado severa, ya que, si la incertidumbre es esencial a la Naturaleza, y si se deriva no sólo de la discontinuidad sino también de la dualidad, como incluso acabó reconociendo Heisenberg, la complementariedad de la dualidad onda-partícula ha de tener algo más que un valor heurístico y no puede ser desechada en cuanto este valor se supone perdido. En consecuencia, si bien es cierto que estos modelos no-estándar (de la dualidad formal) no tienen el significado realista que tienen los modelos estándar de onda y partícula clásicas (para la radiación y para la materia, respectivamente), también es cierto que no tienen únicamente un valor heurístico, como simples *modelos formales*. Es decir, algún significado realista conservan aunque no es el significado “referencialista-pictórico” que poseen los modelos estándar en el marco clásico.

En mi opinión, aquello que Bohr quiere decir es que estos modelos no-estándar no pueden tener un significado realista en el marco conceptual de la física clásica, pero sí en el de la complementariedad, desde el cual incluso el término “significado realista” se ha de entender de otra forma, diferente del que tenía en la teoría referencialista de los modelos visuales o pictóricos⁴¹. Este nuevo significado será “simbólico” en el sentido de que se pueden usar por analogía a su uso ordinario, tal y como mencioné en el capítulo anterior. Sin embargo, Bohr no los considera vacíos de contenido empírico, pues esto es, precisamente, lo que pretendía conservar; de forma que, a pesar de que estos modelos se refieren a propiedades fenoménicas, como el fenómeno también alude al objeto, estos conceptos siguen refiriéndose en última instancia a los objetos atómicos y sólo cambia el modo cómo hacen esta referencia⁴².

En cuanto a la cuestión acerca de la correlación entre las dos complementariedades tanto Jammer como Murdoch afirman que la complementariedad de los modelos de onda y partícula y la

⁴⁰ Murdoch afirma que esta complementariedad de la dualidad onda-partícula sólo sirvió para guiar el pensamiento de Bohr hasta la idea de complementariedad. Cf *Ibid*, p. 79.

⁴¹ En otras palabras, que no tengan un significado realista, en sentido clásico, no les deja sin ningún tipo de referencia empírica, aunque, también es cierto que esta interpretación no-realista de los conceptos clásicos -consecuencia de su renuncia a la posibilidad de visualizar la realidad de esta forma- es la que le permite mantener una interpretación realista del objeto de descripción de la física cuántica, ya que la paradoja se disuelve en el nivel de conceptualización de los términos y, por tanto, no tiene por qué afectar a la realidad de los sistemas atómicos.

⁴² Volveré sobre esta cuestión un poco más adelante y en otras ocasiones.

complementariedad cinemático-dinámica son nociones lógicamente independientes, dado que no hay un único modo sistemático de correlacionar uno de los modelos con la medición de una de las magnitudes de momento o posición⁴³. Murdoch explica el hecho de que a veces el momento, por ejemplo, pueda asociarse al modelo de onda y otras veces al de partícula -y lo mismo ocurre con la posición- utilizando su distinción entre el nivel formal y el empírico de la dualidad onda-partícula:

“La primera postura” -la que relaciona el modelo de onda con la medida del momento, y el modelo de partícula con la posición- “conciene a una correlación puramente formal a propósito de las interpretaciones estándar de los términos en las ecuaciones de Planck-Einstein-de Broglie. La segunda” -la que relaciona el modelo de onda con la determinación de la posición, y el modelo de partícula con el momento- “conciene a una correlación empírica, en la cual la correlación se basa en la interpretación de los experimentos físicos en términos de los modelos. La diferencia entre estos dos modos de ver corresponde a la diferencia entre lo que he llamado *dualidad formal* y *dualidad empírica*”⁴⁴.

Sin embargo, que no haya un modo sistemático de correlacionarlos no implica su independencia, ya que esta doble vinculación se quedaría sin

⁴³ “According to the first view the wave model is correlated with measurements of momentum or energy, for, if the momentum or energy of an object has been measured, a wavelength or frequency may be assigned by way of the Planck-Einstein-de Broglie equations. In this case it is impossible to measure the spatio-temporal location of the object, owing to the uncertainty principle. If, on the other hand, the position of an object has been measured, the object may be conceived of as a particle localised at that position; in which case, owing to the uncertainty principle, the momentum cannot be precisely measured, and consequently no well-defined wavelength can be assigned.

However plausible this first view may seem, it appears to be contradicted by the fact that (a) in some experiments in which energy or momentum may be measured -such as single or double slit experiments in which the diaphragms are loosely attached to the frame- the particle model is the more appropriate, since no diffraction or interference effects are observable; and (b) in other experiments in which position may be measured, such as slit experiments in which the diaphragms are rigidly attached to the frame, diffraction and interference effects are observable; in which case the wave model appears to be the more appropriate”. MURDOCH, D., Niels Bohr's Philosophy of Physics, pp. 66-67. La misma crítica en este punto también la expone Jammer, siguiendo a Weizsäcker. Cf. JAMMER, M., The Philosophy of Quantum Mechanics, p. 103.

⁴⁴ MURDOCH, D., Niels Bohr's Philosophy of Physics, p. 67.

explicación; sólo afecta a la imposibilidad de reducirlas entre sí⁴⁵. Porque ambas posturas son consecuencia de los dos modos de ver el problema de la dualidad onda-corpúsculo, de la necesidad de compaginar los dos usos de estos modelos, el clásico y el cuántico, y del aspecto paradójico del doble significado de la complementariedad. En el marco complementario ambas formulaciones se relacionan lógicamente a través de las nociones básicas que componen el significado mismo de la complementariedad: en la dualidad empírica se da la misma relación de exclusión que en el principio de incertidumbre entre las magnitudes dinámicas y cinemáticas, mientras que la dualidad formal simboliza en el nivel matemático la integridad que también se da en el nivel empírico si queremos obtener toda la información que se puede conseguir de los fenómenos microfísicos. Así, se ve que ambas complementariedades son necesarias para mantener la coherencia de la argumentación de Bohr.

Esta forma de correlacionarlas puede parecer extraña, pero no está fuera de lugar si se tiene en cuenta la diferencia fundamental entre los conceptos de ambas formulaciones.

En primer lugar, los conceptos de onda y partícula están separados en la física clásica, ya que cada uno pertenece a una teoría clásica diferente: el modelo de onda se usa generalmente en la teoría electromagnética de la radiación y el de partícula en la teoría mecánica de la materia; en cambio, en física cuántica están juntos en una sola teoría, la mecánica cuántica, que es aplicable tanto a la materia como a la radiación.

En cuanto a los conceptos de posición y momento, nos encontramos con la situación contraria: van juntos en la mecánica clásica, formando una única descripción, pero se separan en la teoría cuántica, en la que pertenecen a dos tipos de descripciones que se excluyen⁴⁶. De ahí que puedan vincularse la posición y el momento tanto a la noción de onda como de partícula⁴⁷, pero en una relación complementaria en la que se respete la condición de mutua exclusión: ya que en física cuántica se pueden usar los dos modelos porque están unidos (en el sentido no-estándar del nivel

⁴⁵ Razón por la cual pienso que se han de conservar las dos formulaciones físicas de complementariedad, aunque sólo sea en favor de la claridad.

⁴⁶ Cf. MURDOCH, D., Niels Bohr's Philosophy of Physics, p. 57 y 61.

⁴⁷ Por ejemplo, la fórmula $E\tau = I\lambda = h$ relaciona la energía (E) con el período (τ) y la cantidad de movimiento (I) con la longitud de onda (λ); de ahí que el modelo de onda se pueda usar para determinar la energía y la cantidad de movimiento, propiedades que clásicamente se refieren a la idea de partícula. Cf. BOHR, N., "El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica" (1927), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, p. 103.

formal), es posible vincular a ambos con la misma magnitud, o bien con la posición o bien con el momento, pero una excluye a la otra porque tales magnitudes han perdido su vinculación clásica.

Este tipo de correlación es consecuencia del intento de integrar en un sólo marco nociones que se caracterizan unas por haber sido incompatibles y otras compatibles en el marco anterior, mientras que ahora han intercambiado sus relaciones lógicas en el nuevo esquema conceptual volviéndose compatible lo que era incompatible, y viceversa. También se debe al carácter paradójico de la complementariedad, ya mencionado, en el que se busca la forma de compaginar la discontinuidad de la física cuántica con el modelo de continuidad de la física clásica. Es la *doble caracterización* que se puede dar *del problema de la dualidad* la que *relaciona lógicamente ambas formulaciones*.

Antes de pasar a la segunda formulación, insistiré en que la interpretación de la física cuántica se enfrentó a dos enfoques básicos de los problemas epistemológicos con los que se debía tratar: uno era el de comprender cómo la física cuántica había vuelto compatible aquello clásicamente imposible de vincular en una sola imagen, el otro era comprender por qué, a la vez que aquello, la descripción clásica se había vuelto impracticable, dado que sus componentes ahora eran incompatibles.

Las soluciones a estos problemas Bohr las buscó dentro de la propia estructura matemática de la teoría cuántica. Por esto, la primera solución se la ofreció el modo cómo las fórmulas de Planck, Einstein y de Broglie conjugaban las nociones de onda y partícula sin caer en contradicción, porque la realidad de estos modelos no-estándar no se corresponde con la idea de realismo clásico, sino cuántico, o mejor fenoménico, pues en él no hay una clara distinción entre el sujeto y el objeto, entre la observación y el objeto atómico, en cuya unión se da el fenómeno. Razón por la cual en el nivel empírico, donde la aplicación experimental de la teoría es el objetivo, la compatibilidad se hace posible por su mutua exclusión.

En cuanto al segundo problema, la solución la encontró expresada cuantitativamente en las relaciones de Heisenberg, como expondré a continuación.

De ahí que utilizara dos formulaciones de la complementariedad, la primera para enfatizar la solución al problema del contenido físico y del carácter no contradictorio de la dualidad onda-partícula, por medio del uso

restringido⁴⁸ de estos conceptos sin hacer referencia a nada visualizable, y la segunda para poner de relieve más bien la solución indeterminista al problema de la descripción completa.

A pesar de sus diferencias, ambas formulaciones perseguían lo mismo: dotar de contenido intuitivo a la física cuántica. Con la solución de Heisenberg, se descubrió que se debía renunciar al determinismo; con la primera formulación de Bohr de la complementariedad, a las imágenes visuales del realismo clásico.

Sin embargo, esto no era suficiente porque Bohr pensó que, además, estos problemas y sus soluciones debían estar relacionados. Esta relación la buscó siguiendo un razonamiento epistemológico acerca de los supuestos teóricos alrededor de los cuales se construye el marco conceptual apropiado para cierta teoría física: en el caso de la teoría clásica nos encontramos con la idea de continuidad, y en el caso cuántico con la de discontinuidad.

Sus reflexiones puramente epistemológicas comienzan justo en este punto, cuando persigue la correlación entre las dos formulaciones de la complementariedad, que propuso para resolver aquellos problemas⁴⁹.

d) Complementariedad de los conceptos cinemáticos y dinámicos: el principio de indeterminación como su expresión cuantitativa

Esta formulación se refiere a los conceptos de localización espacio-temporal, por un lado, y al de causalidad, por otro, como aspectos complementarios de la descripción, “*los cuales simbolizan las posibilidades de la observación y de la definición, respectivamente*”, aunque esencialmente se trate de dos descripciones distintas que se han vuelto incompatibles en el nivel cuántico.

En tanto que en el marco clásico estas descripciones estaban unidas en un sólo tipo de descripción, nos podemos referir a ellas como si se tratara de dos tipos de magnitudes dentro de la misma descripción clásica. De aquí que se pueda hablar de descripciones, o *imágenes descriptivas*, complementarias tal y como Bohr formuló este tipo de complementariedad, o bien, hablar de los conceptos cinemáticos y dinámicos de la descripción

⁴⁸ Restringido por la propia limitación de la descripción espacio-temporal expresada en las relaciones de indeterminación.

⁴⁹ Esta cuestión será tratada en su lugar oportuno.

complementaria, como aparece en la formulación que dio Pauli de esta misma, la cual se acerca más a las relaciones de indeterminación.

No obstante, dejando de lado la crítica de Weizsäcker⁵⁰, el principio de Heisenberg se suele considerar la formulación cuantitativa de este tipo de complementariedad más general, pues la descripción espacio-temporal se basa en la medida de las magnitudes cinemáticas de espacio y tiempo, y la descripción causal en la de las magnitudes dinámicas de momento y energía⁵¹. Pero, antes de exponer la formulación de Bohr, expondré primero cómo Heisenberg llegó a su principio de indeterminación tal y como fue enunciado por él.

Como ya dije, en el segundo capítulo, durante los meses siguientes a la visita de Schrödinger a Copenhague el tema de las discusiones entre Heisenberg y Bohr fue el de la interpretación física del formalismo matemático recientemente desarrollado⁵². La cuestión sobre la que debatieron, por tanto, era cómo recuperar el carácter intuitivo en física cuántica para conservar el ideal descriptivo y explicativo de la ciencia, ya que una teoría es intuitiva cuando describe físicamente los fenómenos, es decir, cuando la descripción incluye tanto la comprensión como la explicación de aquéllos, además de su descripción matemática. Según cuenta el propio Heisenberg, él llegó a las relaciones de indeterminación después de estas intensas discusiones con Bohr, en las que mantuvieron diferentes posturas:

“... Bohr creía, con razón, que el dualismo aparente era un problema tan importante que lo consideró como el punto de partida natural para llegar a la interpretación correcta. Yo, por mi parte, ponía toda mi confianza en el nuevo formalismo matemático”⁵³.

⁵⁰ Weizsäcker en su noción de “complementariedad circular” prefiere vincular la descripción espacio-temporal a las nociones clásicas y el principio de causalidad a la representación de éstas por medio de la función Ψ , y distinguirla de la “complementariedad paralela” entre las magnitudes cinemáticas y dinámicas. Cf. WEIZSÄCKER, C.F., “Complementariedad y lógica”, en: La imagen física del mundo, pp. 296-298.

⁵¹ Cf. AGAZZI, E., Temas y problemas de la filosofía de la física, p. 314.

⁵² Cf. HEISENBERG, W., “Penetrando en tierra nueva”, en: Diálogos sobre física atómica, pp. 96-100; y también “Recordando a Niels Bohr. Años 1922-1927”, en: Más allá de la física, pp. 58-60.

⁵³ HEISENBERG, W., “Recordando a Niels Bohr. Años 1922-1927”, en: Más allá de la física, p. 58.

De aquel formalismo, y en concreto de la regla de no-conmutabilidad de la ecuación fundamental, deducirá las relaciones de incertidumbre⁵⁴, aunque la idea comenzó a rondarle en septiembre de 1926 tras la visita de Schrödinger a Copenhague:

“Heisenberg se dio cuenta de que una de las principales razones por las que Bohr y Schrödinger a veces parecían estar duramente enfrentados era un conflicto entre conceptos distintos. Ideas como posición y velocidad (o espín, más tarde), no tenían el mismo significado en el mundo de la microfísica que en el mundo ordinario. Así que, ¿cuál era el significado? y ¿cómo pueden relacionarse ambos mundos? Heisenberg volvió a la ecuación fundamental de la mecánica cuántica $p \cdot q - q \cdot p = \hbar/i$ y demostró, a partir de ella, que el producto de las incertidumbres en la posición (Δq) y en el momento (Δp) tienen que ser siempre mayor que \hbar . La misma regla sobre incertidumbres se aplica a cualquier par de lo que se llaman variables conjugadas, variables que multiplicadas entre sí han de tener dimensión de acción, como \hbar (...). Los conceptos clásicos del mundo cotidiano también existen en el mundo atómico, afirmó Heisenberg, pero sólo pueden emplearse en la forma restringida que las relaciones de incertidumbre revelan. Cuanto con más precisión se conozca la posición de una partícula, tanto más imprecisamente conoceremos su momento, y viceversa”⁵⁵.

Las relaciones que extrajo Heisenberg del formalismo matricial imponen un límite a la vinculación de las magnitudes canónicamente conjugadas y este límite está determinado por el cuanto de acción, h . Su expresión, por ejemplo, entre el momento, p , y su localización espacial, x es la siguiente: $\Delta p \cdot \Delta x \geq h$; o también, entre la energía, E , y su variable temporal, t : $\Delta E \cdot \Delta t \geq h$. Estas relaciones⁵⁶ expresan la precisión máxima con la que pueden usarse estos conceptos en física cuántica y, en

⁵⁴ El artículo donde presentó por primera vez estas relaciones de indeterminación fue publicado en 1927 en la revista *Zeitschrift für Physik*, 43, 172-98 (1927), con el título “Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik”. La traducción inglesa, “The Physical Content of Quantum Kinematics and Mechanics”, se encuentra en: WHEELER, P.A./ ZURECK, M.Z. (eds.), Quantum Theory and Measurement.

⁵⁵ GRIBBIN, J., En busca del gato de Schrödinger, pp. 135-136.

⁵⁶ Aunque no son las únicas; en realidad, la incertidumbre afecta a cualquier par de variables conjugadas cuyos productos tengan la misma dimensión que h , como, por ejemplo, el momento angular (A) y la posición angular (γ): $\Delta A \cdot \Delta \gamma \geq h$; o también entre el momento de inercia (I) y la velocidad angular (ω): $\Delta I \cdot \Delta \omega \geq h$.

consecuencia, la precisión máxima con la que se pueden medir estas magnitudes, es decir, cuánto más precisemos una de ellas más incierto se vuelve el valor de la otra.

De modo que, si queremos dar una descripción física completa del sistema microfísico en la que se incluya su descripción espacio-temporal y su evolución causal, tendremos que conformarnos con las probabilidades derivadas de la imprecisión esencial que su combinación ha provocado en el sistema.

Sin embargo, esto no fue lo que más preocupaba a Heisenberg: como ya he dicho, él propuso las relaciones de indeterminación para resolver el problema del contenido intuitivo, estableciendo las condiciones de la conexión entre el formalismo matemático de la física cuántica y el lenguaje ordinario. Es Bohr quien busca, además de esto, la conciliación entre la descripción espacio-temporal y la descripción causal; por esto, propone esta segunda formulación de la complementariedad como la solución a los problemas de las posibilidades de la observación y la definición.

La complementariedad de las magnitudes dinámicas y cinemáticas, que refleja el principio de incertidumbre alude a su carácter de incompatibilidad o mutua exclusión, en tanto que no pueden ser medidas simultáneamente; pero, este principio contiene otra información más: también dice cuáles son los límites entre los que podemos obtener sus valores. Es decir, nos informa acerca de cuáles son las “posibilidades de observación y de definición”, en tanto que la primera se refiere a las magnitudes cinemáticas de las coordenadas espacio-temporales, y la segunda a las dinámicas de momento y energía que establecen la definición causal del sistema observado. Esto fue lo que Bohr quiso destacar del principio de Heisenberg.

“Naturalmente, no se trata de aplicar de manera por completo independiente ya sea la descripción espacio-temporal ya sea la idea de causalidad, sino que, muy al contrario, estos dos puntos de vista de la naturaleza de la luz constituyen dos tentativas diferentes de interpretación de la evidencia experimental en la que la limitación de los conceptos clásicos se expresa en términos complementarios”⁵⁷.

⁵⁷ BOHR, N., “El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica” (1927), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, p. 101.

Estos dos tipos de descripción no sólo eran compatibles en el marco clásico, sino también necesarios para dar una descripción mecánica completa del sistema. Ahora no sólo son incompatibles, sino que, además siguen siendo necesarias para dar ese tipo de descripción completa de los microsistemas. De modo que, la aportación, que Bohr considera más importante, del principio de Heisenberg al esquema conceptual de la física cuántica es que permite su conjugación⁵⁸ a pesar de estar limitada por el valor de h , aparte, por supuesto, de su carácter de exclusión, aunque éste, al fin y al cabo, es algo que ya se deducía de la no-conmutabilidad de las matrices del momento y la posición.

Esa limitación es teórica, aunque coincide con la limitación experimental, y es la que permite a la física cuántica seguir con la aspiración de ofrecer una descripción mecánica completa de los sistemas atómicos, a pesar de que los dos modos de descripción que aquella demanda se hayan vuelto incompatibles en la nueva teoría. Por ello es que la complementariedad tiene que volver a compatibilizar de algún modo estos aspectos de la descripción completa que se muestran mutuamente excluyentes en el ámbito cuántico, aunque no podrá ser el modo como lo eran en la física clásica, con exactitud y simultaneidad, sino bajo el yugo de las probabilidades, establecidas por la incertidumbre de la Naturaleza, que se ajusta a las condiciones matemáticas de la teoría, que así lo imponen.

“Además, las indeterminaciones, expresadas por las relaciones de Heisenberg, son precisamente el precio que hemos de pagar si, no obstante, intentamos aplicar tales tipos de concepciones clásicas mutuamente excluyentes simultáneamente. Los más importantes tipos de concepciones clásicas son compatibles en física clásica pero son mutuamente excluyentes en física cuántica, a pesar de que ambos son necesarios para una información exhaustiva; éstas son las descripciones espacio-temporal y la causal (la última incorpora los teoremas de conservación de la energía y el momento)”⁵⁹.

⁵⁸ “... the proper rôle of the indeterminacy relations consists in assuring quantitatively the logical compatibility of apparently contradictory laws which appear when we use two different experimental arrangement, of which only one permits an unambiguous use of the concept of position, while only the other permits the application of the concept of momentum defined as it is, solely by the law of conservation”. BOHR, N., “Causality and Complementarity” (1937), p. 293.

⁵⁹ JAMMER, M., The Philosophy of Quantum Mechanics, p. 101.

En relación con esto podría decirse que si queremos dar una descripción exacta en sentido clásico, tendremos que conformarnos con uno y otro tipo de descripción, pero no ambas; no obstante, si la descripción es completa, hemos de incluir las dos descripciones, pero este requisito en el marco complementario exige que se cumpla bajo las restricciones del principio de indeterminación.

A través de esta renuncia al ideal clásico de causalidad, es posible considerar a la descripción complementaria completa como una generalización de aquél⁶⁰; esta ampliación de la causalidad conduce al sentido más general de causalidad, del que hablé en el capítulo anterior. Éste abarca tanto a la causalidad clásica como a la causalidad “débil” de la física cuántica, en la cual no existe un vínculo determinista y necesario entre la causa y el efecto, pero tampoco introduce un indeterminismo absoluto en la naturaleza, pues la indeterminación está inscrita en un marco muy preciso, un marco perfectamente delimitado por las relaciones de Heisenberg; es una causalidad que sólo habla de probabilidades pero que no son ilimitadas. Por tanto, si se entiende la relación causal en un sentido más general, puede afirmarse que, si bien en física cuántica no hay determinismo, sí hay causalidad. El motivo es el siguiente, mientras que la causalidad clásica mantiene un vínculo determinista y necesario entre el antecedente y el consecuente, en función de la aplicación rigurosa de los teoremas de conservación a un marco espacio-temporal continuo, el vínculo de la causalidad cuántica es probabilista y, hasta cierto punto, indeterminado, debido a que no puede considerarse a los sistemas físicos como sistemas aislados de toda interacción, con lo cual sólo se puede obtener una causalidad limitada por la presencia de h en las relaciones de indeterminación.

“En el lenguaje de la teoría de la relatividad, el contenido de la fórmula (2) se resume diciendo que, según la teoría cuántica, existe una relación recíproca general entre las precisiones máximas con las cuales pueden definirse los vectores de energía-cantidad de movimiento y de espacio-tiempo asociados con los “individuos”. Esta relación puede ser considerada como una expresión simbólica muy simple de la naturaleza complementaria de la descripción espacio-temporal y del principio de causalidad. Por lo demás, su forma general permite combinar hasta cierto punto el uso de los teoremas de conservación de la energía y de la

⁶⁰ Cf. BOHR, N., “Física y culturas humanas” (1938), en: Física atómica y conocimiento humano, p. 33; y también, “El cuanto de acción y la descripción de la naturaleza” (1929), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, p. 133.

cantidad de movimiento con la representación espacio-temporal de las observaciones: en lugar de la coincidencia de los sucesos bien definidos en un punto del espacio-tiempo, se puede considerar la de “individuos” definidos con una precisión limitada en dominios espacio-temporales finitos”⁶¹.

Es decir, el vínculo de la teoría causal, que la física cuántica establece, es un vínculo impreciso y estadístico entre el antecedente y el consecuente dentro de los límites de las relaciones de Heisenberg; pero, vínculo, de cualquier forma. Estos límites indican que la causalidad ha de tener un carácter más que de certeza y necesidad, de frecuencia y contingencia; ha de ser probabilístico porque está sometida al principio de incertidumbre⁶².

Como consecuencia de esto, el encadenamiento causal al modo clásico no es posible porque ya no hay sistemas que evolucionan de forma continua en una serie causal indefinida de acontecimientos espacio-temporales, sino una serie finita y delimitada por las posibilidades de observación y definición del principio de Heisenberg.

Situación que tiene su parangón, como se recordará, en la ecuación de Schrödinger que, aun teniendo una forma determinista, no puede restaurar el determinismo en microfísica, ya que, cuando es aplicada al sistema para medir, o bien su localización espacio-temporal, o bien su estado dinámico, se produce el “colapso de la función de onda” que, a la vez que ofrece el valor de la magnitud que estamos midiendo, no sólo destruye las posibilidades de determinar el valor de la otra, sino que, además, expresa la imposibilidad de seguir la evolución del sistema cuando dejamos de observarlo: en cuanto se detiene la observación, desaparece el colapso de la función y la ecuación vuelve a presentar toda una serie nueva

⁶¹ BOHR, N., “El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica” (1927), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, pp. 105-106. La fórmula (2), a la que se refiere Bohr, es la del principio de indeterminación; la “precisión limitada” es la que establece este principio de Heisenberg y, en cuanto a la expresión “en dominios espacio-temporales finitos” Bohr hace referencia a la ruptura de la continuidad matemática del espacio y del tiempo, pues ya no son infinitamente divisibles.

⁶² Por esta razón, D’Espagnat da una definición de causalidad que parte de la idea de influencia y donde se sustituyen las conexiones causales necesarias por conexiones causales frecuentes: “Los sucesos *A* influirán (apreciablemente) en los sucesos *B*, si y sólo si la frecuencia con la cual tienen lugar los sucesos *B* es (apreciablemente) distinta según que se imponga o no la existencia de los sucesos *A*”. D’ESPAGNAT, B., En busca de lo real. La visión de un físico, p. 225.

de probabilidades, entre las cuales no hay ninguna efectiva hasta la próxima observación con su consiguiente colapso de la función Ψ .

Por lo cual, cuando aquella serie se nos acaba, debemos empezar de nuevo con otra distinta que establecerá las nuevas condiciones de ese sistema, el cual ha padecido un “salto” en su evolución causal en el espacio y en el tiempo. Es decir, no podemos volver exactamente al punto donde lo dejamos y continuar a partir de él, como si nada hubiera acontecido entre esos dos momentos, porque sí ha habido una ruptura en la sucesión de éstos a causa de la diferencia energética que ha introducido en ellos el cuanto de acción, la cual no es susceptible de un análisis, o medida espacio-temporal, desde el que pudiéramos contrarrestar sus consecuencias y asignar una continuidad en el enlace causal. Por tanto, ya no tenemos una serie causal continua o indefinida, sino diversas series causales que empiezan y terminan intermitentemente; en ella también hay discontinuidad, “saltos causales” que impiden que el principio de causalidad se aplique de manera estricta.

Mientras que el interés de Heisenberg se centró en la discontinuidad inherente al proceso de medida, a la hora de explicar las relaciones de incertidumbre, Bohr demostró que estas relaciones se pueden derivar del modelo de onda del electrón⁶³ y, por tanto, prefirió considerar tal incertidumbre como una consecuencia de la dualidad onda-corpúsculo⁶⁴. Esto mismo, dicho en palabras del propio Bohr:

“El punto esencial de estas consideraciones es que no cabe evitar el postulado cuántico a la hora de estimar las posibilidades de medida. No obstante, es preciso aún examinar de cerca las posibilidades de definición para sacar a la luz todos los aspectos del carácter complementario de la descripción de los fenómenos. En realidad, no es el cambio discontinuo de energía y de la cantidad de movimiento de la partícula en el curso del

⁶³ Cf. BOHR, N., “El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica” (1927), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, pp. 103-106.

⁶⁴ Cf. JAMMER, M., The Philosophy of Quantum Mechanics, pp. 92-93 y 98. Y también: MURDOCH, D., Niels Bohr's Philosophy of Physics, pp. 48-51: “Bohr argued that what precludes the measurement of the momentum of the electron in the ‘gamma-ray microscope’ experiment is not the discontinuity of the momentum change as such but rather the impossibility of *measuring* the change. What prevents measurement of the momentum change is the indispensability of the wave model for the interpretation of this experiment. (...) while gamma radiation may appropriately be described in terms of the particle model, it is the indispensability of the wave model for the interpretation of the experiment that precludes the precise measurement of the momentum of the electron”, p. 49.

proceso de observación lo que podría por sí mismo impedirnos atribuir valores precisos tanto a las coordenadas espacio-temporales como a la energía y a la cantidad de movimiento antes y después de este proceso. La incertidumbre recíproca que afecta siempre a los valores de esas cantidades es en esencia, como deja claro el análisis precedente -Bohr se refiere al análisis del modelo de onda para el electrón del que deriva las relaciones de indeterminación- un resultado de la precisión limitada con la que pueden definirse los cambios en la energía y en la cantidad de movimiento cuando los campos de ondas utilizados para la determinación de las coordenadas espacio-temporales de la partícula son suficientemente pequeños”⁶⁵.

De esta forma se llega a que, tal y como narra Heisenberg, su búsqueda particular del contenido físico del formalismo acabó con el descubrimiento de las relaciones de indeterminación a través de la solución que se buscó al problema de la trayectoria del electrón en la cámara de niebla.

En la medida en que al final Bohr y Heisenberg se pusieron de acuerdo en que estas relaciones eran la expresión cuantitativa de las posibilidades de observación y de definición, se ve que el problema de la trayectoria simboliza el problema más general de la descripción clásica.

“Por un lado, la definición del estado de un sistema, tal y como se entiende de ordinario, exige la eliminación de toda perturbación externa, lo que, según el postulado cuántico, excluye también toda posibilidad de observación y sobre todo hace que los conceptos de espacio y tiempo pierdan su sentido inmediato. Si, por otro lado, y con el objeto de hacer posible la observación, admitimos la eventualidad de interacciones con los instrumentos de medida apropiados, que no pertenecen al sistema, se hace imposible, por la naturaleza misma de las cosas, definir de manera inequívoca el estado del sistema y en consecuencia no puede ser cuestión de la causalidad en el sentido ordinario de la palabra. Es preciso, pues, considerar una modificación radical de la relación entre la descripción en el espacio y en el tiempo y el principio de causalidad, que simbolizan respectivamente las posibilidades ideales de observación y de definición, y cuya unión es característica de las teorías clásicas: a partir de la esencia misma de la teoría cuántica debemos contentarnos con concebirlas como

⁶⁵ BOHR, N., “El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica” (1927), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, p. 108 (y desarrolla la explicación de esta situación en las páginas siguientes, de la 108 hasta la 113).

aspectos complementarios, pero que se excluyen mutuamente, de nuestra representación de los resultados experimentales”⁶⁶.

Éste es el punto que tienen en común el principio de indeterminación de Heisenberg y la formulación de complementariedad entre las descripciones dinámica y cinemática.

La diferencia es que la idea que guió a Bohr fue la dualidad onda-partícula, el modo como estas nociones pueden relacionarse para conseguir mantener un cierto significado, con el que poder acceder a una interpretación física del esquema matemático⁶⁷. En cambio, las reflexiones de Heisenberg giraron siempre en torno al esquema matricial de la mecánica cuántica, donde ya se había renunciado a los modelos visuales de onda y partícula.

Las discusiones entre Heisenberg y Bohr acerca de este tema concluyeron cuando acordaron que las relaciones de indeterminación son un caso particular de complementariedad. Esto fue lo que le permitió a Bohr relacionar ambas formulaciones y considerar que las limitaciones que expresan las relaciones de indeterminación también regulan el uso de los modelos clásicos de onda y partícula, y con ello salvar el uso delimitado por esas restricciones de los conceptos clásicos, evitando su alusión a ninguna representación visual:

“El autor ha demostrado que la indeterminación fundamental a la que nos enfrentamos aquí puede ser considerada como la expresión directa de la limitación absoluta que afecta al uso de las representaciones intuitivas en la descripción de los fenómenos atómicos, una limitación que se había presentado bajo la apariencia de un dilema en la cuestión de la naturaleza de la luz y de la materia”⁶⁸.

⁶⁶ BOHR, N., “El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica” (1927), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, p. 100.

⁶⁷ “También él en Noruega, había sistematizado plenamente el concepto de complementariedad, de forma que el dualismo entre la imagen de las ondas y la de las partículas fuera el punto de partida de la interpretación”. HEISENBERG, W., “Recordando a Niels Bohr. Años 1922-1927”, en: Más allá de la Física, p. 60.

⁶⁸ BOHR, N., *La teoría atómica y los principios fundamentales de la descripción de la naturaleza* (1929), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, p. 152. Ver también la página 136.

Por este motivo, el primero acabó admitiendo, al final de su artículo, que la incertidumbre no sólo se debe a la discontinuidad también depende de la dualidad⁶⁹.

“El principio de Heisenberg es virtualmente un caso especial de la tesis de Bohr: la postura de que la teoría cuántica no permite una descripción clásica espacio-temporal virtualmente implica la tesis de que la noción clásica de una trayectoria definida no está bien definida en la teoría cuántica. El principio de incertidumbre supuso verdaderamente «la revolución completa de los conceptos sobre los cuales la descripción de la Naturaleza se había apoyado hasta ahora» que Bohr había supuesto al menos desde Julio de 1925”⁷⁰.

Así, aunque Bohr mencione las relaciones de Heisenberg más frecuentemente que la propia dualidad para ilustrar la situación tan peculiar de la física cuántica, consideró que la complementariedad onda-corpúsculo era la que resolvía, en última instancia, el problema del contenido físico⁷¹; mientras que la segunda formulación, basada en el principio de Heisenberg, era la que solucionaba, además de aquello, el problema de la descripción mecánica completa.

4.2) *Los Componentes de la “Lección Epistemológica”*

La filosofía de la complementariedad nació con el objetivo de solucionar todos esos problemas, compatibilizando aquello que se había vuelto incompatible, para lo cual Bohr ofreció dos formulaciones físicas de la complementariedad. La primera, que hace referencia a la dualidad onda-corpúsculo, le sirvió para dar sentido físico a la teoría cuántica sin salirse de las condiciones especiales que imponen sus matemáticas; la segunda, acerca de la dualidad entre la descripción espacio-temporal y la causalidad,

⁶⁹ Cf. HEISENBERG, W., “The Physical content of Quantum Kinematics and Mechanics”, pp. 83-84.

⁷⁰ MURDOCH, D., *Niels Bohr's Philosophy of Physics*, p. 51.

⁷¹ De ahí la gran importancia que tiene esta formulación de la complementariedad en el pensamiento de Bohr y el motivo por el cual no debe ser menospreciada de la manera como hace Murdoch.

fue utilizada por Bohr para dar a la descripción cuántica el carácter de descripción mecánica completa⁷².

A cambio, se tuvo que aceptar la imprecisión (o incertidumbre) y la discontinuidad como rasgos esenciales de la Naturaleza; pero la ventaja fue que de esta propuesta sacó una enseñanza epistemológica, desde la que recuperó la objetividad y el contenido intuitivo de la descripción complementaria y que le sirvió para proponer la unidad del conocimiento humano. Esta lección puede desglosarse en los siguientes términos, los cuales han ido surgiendo ya y reaparecerán a lo largo del capítulo.

a) Primer elemento: “marcos conceptuales revisables”

Toda teoría física se da dentro de un marco conceptual, el cual está regido por determinados postulados.

Esta tesis se encarga de recordar que los conceptos clásicos fueron contruidos dentro del campo de experiencia de esta física y que, por tanto, ellos llevan imbricadas las condiciones del marco clásico, las cuales regulan el uso y el significado de tales conceptos.

Esta consideración está directamente relacionada con la postura que mantuvo Bohr frente a la Naturaleza y a nuestro conocimiento de ella: el hombre está en el mundo como actor y espectador, de modo que la realidad posee una legalidad externa, que se nos impone, pero vinculada a la actividad humana a la hora de indagar en ella. Así, el mundo que podemos conocer va cambiando a medida que avanzamos en nuestras investigaciones y descubrimientos, pues la función de las ciencias ya no es estudiar una realidad sustancial, sino buscar las relaciones entre los hechos de nuestras diversas experiencias.

Por esto, dirá Bohr que la tarea epistemológica consiste en ordenar la información que ofrece la teoría conforme a una revisión del marco conceptual, ya que éste es el que establece el tipo de relaciones que se han de dar entre los conceptos teóricos. Ésta es la *primera enseñanza*; esto es, que los marcos conceptuales de las teorías se construyen partiendo de los postulados que gobiernan la aplicabilidad de los conceptos a la hora de describir la realidad física.

⁷² No obstante, es cierto que ambas contienen básicamente las mismas implicaciones, ya que, esencialmente, se refieren a lo mismo; Bohr sólo las empleó por separado para ganar claridad en la exposición.

Por lo tanto, el punto de partida es un análisis de aquellos postulados, porque son ellos los que determinan y gobiernan las relaciones y las condiciones previas donde se ha de enmarcar la propia teoría y la validez y tipo de aplicabilidad de sus conceptos. El hecho de que se hayan vuelto ambiguos, al ampliar nuestra experiencia al nivel de los microfenómenos, revela que los conceptos clásicos tienen una validez restringida. Pero Bohr descubrió que se podían mantener los mismos conceptos si se elimina la ambigüedad, ampliando su significado, al cambiar las relaciones que estos conceptos mantienen dentro del marco teórico, reguladoras del uso y significado de aquéllos.

Así pues, es la tesis de ampliación del marco conceptual, que a su vez contiene dos elementos básicos, idealización y limitación de las nociones clásicas, junto con la idea de discontinuidad del postulado cuántico, aquello que marca el camino de la revisión, por la que debe comenzar la lección epistemológica⁷³.

Dado que, en la ciencia, el futuro está siempre abierto a nuevas ampliaciones de este tipo, porque su objetivo es abarcar un campo de experiencia cada vez mayor, los marcos conceptuales de las teorías han de ser revisados cada cierto tiempo y reformados para que el conocimiento científico progrese sin que aparezcan paradojas y problemas conceptuales, como le ocurrió a la teoría cuántica. Los cuales se producen por el mal uso que se hace de los términos conceptuales, al no tener en cuenta que ahora los estamos aplicando a un área de experiencia más amplia, esencialmente distinta de aquella desde la que fueron construidos.

De modo que, las condiciones para una comunicación inambigua, y por tanto objetiva, de las experiencias científicas, que se dan dentro de un marco conceptual, son revisables, ya que su origen está en el hecho de que nuestro área de experiencia se ha ampliado. Además, Bohr enfocará esta necesidad de ampliar el marco conceptual, propia de la física cuántica, como un caso particular de la situación más general que afecta a toda la actividad científica:

“En su lección epistemológica la complementariedad incluye una explicación de cómo los marcos conceptuales son reformados a través del progreso de la ciencia. (...) La Historia revela que a menos que los supuestos que gobiernan la aplicación de los conceptos para la descripción de la Naturaleza sean periódicamente criticados y revisados,

⁷³ Dejaré este tema para el próximo apartado.

la expansión del conocimiento dentro de nuevos dominios generará paradojas e inconsistencias”⁷⁴.

Ésta es la *enseñanza fundamental* que puede extraerse de la lección epistemológica de Bohr, pues tal situación no es sólo propia de los conceptos clásicos, sino que también afecta a todos nuestros conceptos, incluido el uso que se hace de éstos en física cuántica: debido a su inherente imprecisión, también podrán ser contemplados, desde un área de experiencia más amplia, aún por descubrir, como demasiado “estrechos” para dar razón de las nuevas relaciones que la Naturaleza manifiesta al investigador; pero esta limitación será tan fructífera como la actual en la medida en que brindará del mismo modo una nueva forma de ordenar las experiencias, desde la revisión del marco conceptual que dará lugar a otro más amplio que el de la física cuántica, aunque basado en él como ahora hace ésta con el sistema de conceptos de la física clásica.

De ahí que Heisenberg se exprese de este modo con respecto a esto último:

“De cuanto acabamos de decir se desprende que el comprender esta situación lógica, en que hemos de calificar de falta de sentido una cuestión en apariencia bien planteada, es la condición previa para comprender la física moderna. Por otra parte, precisamente la física moderna nos enseña también que condenar por erróneo el planteamiento de un problema sólo puede resultar posible y fecundo cuando se han hallado las relaciones abstractas que crean la necesaria libertad. De hecho, aunque todos los conceptos de que nos servimos para describir la naturaleza sean forzosamente imprecisos y lo sean en puntos que de antemano no podemos saber, la comprobación de esta falta de claridad sólo nos proporciona nuevos conocimientos cuando cabe aprovecharlos de un modo determinado para comprender nuevas relaciones. Mientras esto no se logre, no existe criterio seguro alguno para juzgar si un problema está bien planteado (...).

No obstante, el descubrimiento de las nuevas relaciones mismas conduce a una nueva situación, que nos da la posibilidad de adentrarnos en un mundo conceptual que es cualitativamente distinto del anterior. (...) Pues, en efecto, aunque las nuevas relaciones no puedan servirse de conceptos mejor definidos en general que los clásicos, y aunque en el futuro sea tan posible una revisión de estos conceptos como lo ha sido la de los anteriores, no obstante, los conceptos que han surgido en estas teorías han resultado ser tan idóneos para ordenar nuestras experiencias más afinadas,

⁷⁴ FOLSE, H., The Philosophy of Niels Bohr, p. 13.

que tenemos motivo para considerar que son tan adecuados a estas nuevas experiencias como lo eran los antiguos a las experiencias de la vida cotidiana; constituirán, pues, como los precedentes, la condición previa de toda ulterior evolución de la física. En el fondo, el descubrimiento de un nuevo sistema de conceptos no significa otra cosa que el descubrimiento de una nueva posibilidad de pensamiento, que, como tal, no puede anularse nunca”⁷⁵.

b) Segundo elemento: “intuición y representabilidad simbólica del lenguaje físico”

Este segundo elemento de la “lección epistemológica” establece que *el contenido intuitivo de las teorías físicas ha de ser por analogía y estar basado en símbolos de la realidad, cuya referencia empírica no es el objeto tal cual es, sino el fenómeno y su símbolo.*

De esta forma puede revisarse el marco teórico, manteniendo los mismos conceptos que el anterior pero sin la ambigüedad, que introdujeron en mecánica cuántica.

La explicación de esto es la siguiente: Bohr defiende que los postulados pueden ser sustituidos por otros, dando lugar a otro marco. Así pues, cuando se sustituye el supuesto clásico de la continuidad por el de discontinuidad cuántica, nos encontramos con la posibilidad de seguir empleando los mismos conceptos de forma inambigua, aunque con un significado y un uso distintos del que tenían cuando estaban gobernados por la continuidad.

El nuevo postulado establecerá ahora otras relaciones entre los conceptos, las cuales nos obligan a revisar el contenido de todas las nociones clásicas. La complementariedad surge de este estudio acerca de cómo han de ser las nuevas relaciones y las condiciones bajo las cuales pueden seguir usándose los conceptos clásicos para describir fenómenos cuánticos de forma inambigua.

Tales relaciones no pueden ignorar la inseparabilidad sujeto-objeto, debido a la presencia del cuanto de acción y, si bien, ésta es la causante de no poder mantener el ideal clásico de causalidad y por tanto, de la incertidumbre, también es la que disuelve el problema de la dualidad onda-corpúsculo, al conseguir compatibilizar aquello que era clásicamente

⁷⁵ HEISENBERG, W., “Cuestiones de principio de la física moderna”, en: Los nuevos fundamentos de la ciencia, pp. 183-185.

incompatible, por requerir tener en cuenta el dispositivo experimental, lo cual nos lleva a concebir las relaciones entre los conceptos descriptivos como de mutua exclusión y complementarias. Una vez, así disueltas las paradojas, se consigue dotar de contenido físico a la descripción cuántica, al no tener que renunciar al empleo de aquellos conceptos, pues sólo se renuncia a su sentido clásico como representaciones pictóricas de los objetos. Se pierde su significado realista pero no su valor explicativo; pues la necesidad de dar un modelo espacio-temporal de los microfenómenos, sin recurrir a su visualización, lleva a Bohr a conservar uno simbólico, en el que su carácter fenoménico permite usarlos por analogía a su uso clásico.

Esta circunstancia viene provocada por el descubrimiento que la física cuántica ha revelado acerca de las propiedades de los objetos atómicos. Es decir, en tanto que la característica esencial de estas propiedades es que son fenoménicas y que, por tanto, no se refieren sólo al objeto sino también al sujeto, la referencia de estos conceptos no es el objeto tal cual representado pictóricamente por el término lingüístico, sino que el objeto de la referencia es un *símbolo*, desde el cual no se puede separar la realidad de nuestra actuación sobre ella.

Dicho de otro modo: las propiedades espacio-temporales que definen al objeto, en el marco clásico son objetivas, pero en la complementariedad sólo pueden ser fenoménicas.

Este uso analógico y simbólico de los conceptos es el único permitido por el esquema matemático de la teoría para mantenerlos en su marco teórico despojados de toda ambigüedad y, a la vez, que permite tender un puente entre el lenguaje ordinario y el formalismo de la teoría, entre el contenido físico del primero y la abstracción matemática del último, entre la explicación y la descripción.

Además, aquella misma interacción entre los objetos y el sujeto, que utiliza dispositivos experimentales para observarlos, da la clave para compatibilizar lo que cuánticamente es incompatible, la descripción causal y la espacio-temporal, con lo cual se conserva el tipo de descripción mecánica que se realiza a través de las magnitudes dinámicas y cinemáticas, aunque con un cierta imprecisión, sin restaurar el determinismo causal del mundo físico.

En definitiva, por un lado, en tanto que una de las condiciones requeridas para la comunicación inambigua, como expondré a continuación, es que los instrumentos de observación deben ser descritos en términos clásicos, como son el de “campo magnético”, “posición”, “velocidad”, “longitud de onda”, etc., y a pesar de que estos conceptos están inseparablemente vinculados a la posibilidad de dar una descripción

“visual”, hemos de resignarnos a no poder prescindir de ellos. Pues, estos términos son necesarios para describir los dispositivos experimentales en lenguaje ordinario, el cual permite obtener una interpretación de todas nuestras experiencias en la que se consigue relacionar el simbolismo matemático de la teoría cuántica con los resultados de la observación⁷⁶.

Esta necesidad puede ser cumplida dentro de los límites que establece el principio de Heisenberg y que sugiere el principio de correspondencia, en el uso que podemos hacer de los conceptos clásicos en la microfísica⁷⁷.

Por otro lado, el objetivo que se propone Bohr al solucionar el problema de la dualidad onda-partícula a través de la complementariedad no es salvar la posibilidad de dar una imagen visual de los objetos atómicos, sino todo lo contrario, es esto lo que sacrifica con la finalidad de conservar algo del contenido físico que estos modelos tienen y que, en ningún caso, será su característica clásica de visualizar los objetos.

“Es justamente el reconocimiento de este carácter complementario de las analogías mecánicas, mediante las cuales se ha intentado hacer intuitivas las diversas acciones de la radiación, lo que ha conducido a una solución enteramente satisfactoria de los enigmas de que se ha hablado anteriormente a propósito de las propiedades de la luz. Del mismo modo, solo teniendo en cuenta relaciones de complementariedad existentes entre las diferentes enseñanzas obtenidas sobre el comportamiento de las partículas atómicas, hemos llegado a comprender el contraste patente entre las propiedades de los modelos mecánicos ordinarios y las leyes peculiares de estabilidad que rigen las estructuras atómicas y que forman la base de toda explicación precisa de las propiedades físicas y químicas de la materia”⁷⁸.

Éste es el objetivo principal del *segundo elemento de la lección epistemológica*: salvar algo del significado de estos conceptos para seguir usándolos en física cuántica y así obtener una interpretación física de la descripción matemática de su formalismo. Tan importante es para Bohr

⁷⁶ Cf. BOHR, N., “Física y culturas humanas” (1938), en: Física atómica y conocimiento humano, p. 32.

⁷⁷ Cf. BOHR, N., “Luz y vida” (1932), en: Física atómica y conocimiento humano, p. 8.

⁷⁸ BOHR, N., “Física y culturas humanas” (1938), en: Física atómica y conocimiento humano, p. 33.

alcanzar este objetivo que está dispuesto a sacrificar todo lo que sea necesario para conservar los conceptos con dicho contenido⁷⁹.

c) Tercer elemento: “inambigüedad de la información”

En el marco clásico una descripción objetiva era aquella que describía la realidad independiente del sujeto, pero, si se tiene presente la lección epistemológica de Bohr, la cual nos enseña que los marcos conceptuales de las teorías físicas se construyen en base a unos supuestos que gobiernan la aplicabilidad de los conceptos a la hora de describir la Naturaleza⁸⁰, entonces debemos revisar las nociones clásicas, entre las que se halla la noción de “objetividad”, pues los supuestos han cambiado.

“Así, es la Naturaleza, el objeto de la descripción en la ciencia, la que determina la objetividad de una descripción al forzar a la ciencia a remodelar su marco de acuerdo con nuevos supuestos para una comunicación inambigua que nosotros aprendemos cuando nuestra experiencia de la naturaleza se expande dentro de nuevos campos”⁸¹.

El postulado cuántico no permite hablar de la descripción de una “realidad independiente”, ya que esta noción se ha revelado como una idealización más del marco clásico que se vuelve impracticable fuera de su dominio; pero, sí es posible ofrecer una descripción objetiva, desde el punto de vista de que la física cuántica ofrece una información inambigua y comunicable a los demás.

A partir de ahora, *una descripción será objetiva cuando describa de forma inambigua las experiencias físicas, respetando las condiciones intersubjetivas de un lenguaje con contenido físico, en el que se disuelven las paradojas y nos ofrece una información inequívoca acerca de los sistemas atómicos*. En esto consiste el tercer elemento de la lección epistemológica.

Así pues, la descripción objetiva cumple el requisito de ser inambigua tanto para el marco clásico como para la complementariedad, sólo que el primero, además, sostenía que hacía referencia a un objeto

⁷⁹ Cf. BOHR, N., “El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica” (1927), en: *La teoría atómica y la descripción de la naturaleza*, pp. 102 y 120.

⁸⁰ Cf. FOLSE, H., *The Philosophy of Niels Bohr*, pp. 13-17.

⁸¹ *Ibid*, p. 16.

independiente de la observación⁸², mientras que el marco complementario ha de incluir en la descripción objetiva todo el dispositivo experimental, debido a que no hay una clara distinción entre el objeto observado y el instrumento de medida.

En definitiva, entre las nociones clásicas, que se han de revisar, la noción de objetividad no es una excepción, pues los postulados han cambiado, y con ellos la forma de relacionar y de usar los conceptos; ahora han de cumplir un requisito fundamental, que consiste en aportar un uso inambiguo como condición de la descripción objetiva de los fenómenos cuánticos.

La complementariedad propone nuevas condiciones para la descripción objetiva que la apartan del requisito clásico de representar objetos “reales”; y es que, al cambiar la referencia de los conceptos, las teorías buscarán los requisitos para su objetividad en la descripción fenoménica, en un lenguaje inambiguo basado en la intersubjetividad y no en el carácter ontológico de la representación de objetos reales.

Por tanto, aunque la descripción física siga aludiendo, en último término, a los objetos, su valor de objetividad no depende ahora de ellos sino de los dos siguientes factores: se ha de incluir en ella, por un lado, la descripción de toda la situación experimental, según la exigencia de la revisada noción de observación, y, por otro, también se ha de considerar la ampliación del marco conceptual, en el que se inscribe el fenómeno estudiado, como requieren las condiciones para la comunicación inambigua de tal información sobre el fenómeno.

Este es el motivo por el cual Bohr afirma que la objetividad cuántica es una generalización de la clásica, ya que ésta se ha revelado como una idealización en la que no se tiene en cuenta el papel fundamental de estos dos factores, que sí incorpora la noción cuántica en el marco de la complementariedad, por vincular inseparablemente en el concepto de observación el dispositivo de medida que utiliza el experimentador al objeto de la medición. En consecuencia, el significado del término “objetivo” es ahora más amplio, volviéndose aplicable tanto al dominio clásico como al cuántico.

Ahora bien, la complementariedad *nació de la noción de “reciprocidad”*; se *desarrolló como el principio epistemológico* que dio lugar a un nuevo *marco conceptual* para la física, desde el que se definieron nuevamente los conceptos que en ella se utilizan; y *culminó en una filosofía de la ciencia*, a partir de la cual Bohr propuso una revisión del significado y

⁸² Cf. *Ibid.*, pp. 197-198.

la naturaleza de la actividad científica en su totalidad y del tipo de conocimiento, o información, que ésta aporta sobre la realidad. Los dos primeros momentos en la evolución del pensamiento de Bohr ya los he analizado ampliamente, véase ahora brevemente, cómo llegó a este último.

d) Cuarto elemento: “unidad del conocimiento humano”

A lo largo de este capítulo he ido exponiendo la siguiente idea: la tarea epistemológica que propone Bohr consiste en ordenar la información que nos ofrece el esquema matemático de la teoría conforme a una revisión del marco conceptual⁸³. Más tarde profundizaré en que tal revisión implica una generalización racional de la física clásica por medio de la física cuántica, pero, de momento señalaré que sirvió para conseguir una descripción coherente, objetiva y completa de los fenómenos atómicos, cuyo alcance supera al de la física clásica, dado que tiene en cuenta el cuanto de acción.

No obstante utilizó, además, esta misma idea para proponer una unificación entre todas las ciencias. Tal planteamiento obedece a una de sus convicciones más fuertes, que consiste en lo siguiente: *“todas las ciencias deberían proporcionar una descripción singular, consistente y armoniosa del único mundo que es el objeto de toda experiencia humana, la “naturaleza”. La descripción científica de la naturaleza está entonces inseparablemente vinculada a la tarea filosófica de formular un marco conceptual comprensivo para una descripción de toda ella. Pero la necesaria condición para el uso de cualquier marco en ciencia es que describa la naturaleza “objetivamente”*.⁸⁴

Es en este punto, donde las reflexiones de Bohr se han alejado ya de la situación concreta de la física cuántica, aunque considera que estas enseñanzas sobre la naturaleza del conocimiento científico nos las ha proporcionado directamente la física⁸⁵.

⁸³ Cf. BOHR, N., “Unidad del conocimiento” (1954), en: Física atómica y conocimiento humano, p. 84.

⁸⁴ FOLSE, H., The Philosophy of Niels Bohr, p. 14.

⁸⁵ “La cuestión que quisiera plantear es, más bien, la siguiente: ¿cómo ha sido posible semejante revisión de nuestros conceptos físicos fundamentales? ¿Cuál es, frente a tal revisión, el fondo de verdad de la física clásica y cuál el de la física moderna? Suscitando estas cuestiones nos adentramos en el terreno de los problemas que fueron planteados por Niels Bohr partiendo de los principios de la teoría de los cuantos”. HEISENBERG, W., “Cuestiones de

Aquello que le llevó de sus consideraciones sobre la física cuántica a estas otras de “*alcance más general*” fue el problema de la observación, el cual también afecta al resto de las ciencias, como ocurre, por ejemplo, en biología y en psicología. Tales consideraciones acerca del concepto de observación le llevaron a afirmar que la situación de la física cuántica es sólo un caso particular de una situación más general, que afecta a toda la actividad científica. Porque la enseñanza que Bohr extrajo de ella es que todas las ciencias tienen dificultades, al expresar y comunicar a los demás, a través del lenguaje, los avances en el conocimiento, ya que este avance implica siempre una ampliación del marco teórico y del significado de sus conceptos. Por esta razón, Bohr dará, a parte de las formulaciones físicas, otras dos formulaciones de la complementariedad: una en biología y otra en psicología⁸⁶.

Dos son las características, que encontró Bohr tanto en biología como en psicología, paralelas a la situación que se da en física, y que se corresponden con los dos factores⁸⁷, puestos de relieve en su teoría de la medida, que se revelaron ineludibles, y que poseen un papel decisivo en el proceso de medición, el cual es la base experimental de toda ciencia natural.

En concreto, Bohr subrayó la *analogía con la biología* desde la circunstancia bajo la cual las condiciones que precisa el modo de descripción vitalista o finalista excluyen las condiciones del modo de descripción mecánico, y viceversa:

“Lo que hemos aprendido acerca del papel que desempeñan los instrumentos de observación en la definición de los conceptos físicos elementales va a darnos la clave de la aplicación lógica de conceptos como el de finalidad, ajenos a la física, que se prestan inmediatamente a la descripción de fenómenos orgánicos. En efecto, sobre este panorama, las actitudes mecanicista y finalista no representan puntos de vista contradictorios sobre los problemas biológicos, sino que más bien destacan la existencia de dos tipos de condiciones de observación que se

principio de la física moderna”, en: Los nuevos fundamentos de la ciencia, p. 175. Ver también, BOHR, N., Física atómica y conocimiento humano, pp. 92 y 102.

⁸⁶ Estas otras formulaciones de la complementariedad sólo serán mencionadas en este trabajo como puente hacia su concepción de la unidad de la ciencia, aunque Bohr las trató extensamente en sus últimos ensayos.

⁸⁷ Esto es, la complementariedad de descripciones mutuamente excluyentes, pero ambas necesarias para agotar toda la información, y el carácter de totalidad de la descripción objetiva, en la que no se puede separar al dispositivo experimental del objeto.

excluyen mutuamente y que son igualmente indispensables en nuestra búsqueda de una descripción cada vez más completa de la vida. Bien entendido que no se trata aquí de dar a la vida una explicación análoga a las descripciones que hace la física clásica del funcionamiento de construcciones mecánicas sencillas o de complicadas máquinas electrónicas de calcular, sino de proseguir este análisis de las bases de partida y del alcance de nuestros medios conceptuales de comunicación, tan característico del reciente desarrollo de la física”⁸⁸.

En cuanto a la *relación con la psicología*, Bohr pondrá de relieve la dificultad de demarcar el contenido objetivo, impuesta en física por la indivisibilidad del cuanto de acción, y en psicología por la imposibilidad de separar claramente entre los fenómenos estudiados y su percepción consciente por parte del investigador, lo cual supone un carácter de totalidad a este tipo de fenómenos al no poder ignorar la profunda relación entre el sujeto y el objeto en nuestro proceso cognoscitivo:

“Esta última cuestión nos lleva de nuevo a los dominios de la psicología, donde las dificultades planteadas por los problemas de definición y observación en las investigaciones científicas han sido claramente reconocidas mucho antes que tales cuestiones llegaran a hacerse acuciantes en las ciencias de la Naturaleza. En efecto, la imposibilidad de hacer una distinción precisa en el análisis psicológico entre los fenómenos mismos y su percepción consciente exige claramente que se renuncie a toda descripción causal al modo de la física clásica; la misma forma en que se utilizan palabras tales como *pensamientos* y *sentimientos* para describir experiencias psíquicas recuerda muy sugestivamente la complementariedad de la física atómica. No entraré aquí en más detalles, limitándome a destacar que es precisamente esta imposibilidad (en la introspección) de hacer una distinción neta entre sujeto y objeto lo que proporciona la necesaria amplitud para que se manifieste la volición”⁸⁹.

⁸⁸ BOHR, N., “La física y el problema de la vida” (1957), en: Física atómica y conocimiento humano, pp. 124-125. Ver también, pp. 10, 12-14, 25-27, 92-94 y 112-113.

⁸⁹ BOHR, N., “Biología y física atómica” (1937), en: Física atómica y conocimiento humano, p. 27. Y de una forma más concisa pueden encontrarse en la misma obra afirmaciones como ésta: “Sin duda, la necesidad de considerar en mecánica atómica la interacción entre los instrumentos de medida y el objeto a investigar ofrece estrecha analogía con las peculiares dificultades del análisis psicológico, procedentes de que el contenido de la conciencia es alterado invariablemente cuando se concentra la atención sobre cualquiera de sus elementos ...”, p. 15. Ver también, pp. 33-34, 64-65, 94-97 y 113-114.

En un principio, en los escritos recogidos en “La teoría atómica y la descripción de la naturaleza”, menciona las coincidencias entre la descripción complementaria en física y en psicología y biología sólo como ejemplos ilustrativos que le sirven para aclarar cuál es la situación de la física cuántica respecto del problema de la observación y la objetividad⁹⁰. Más tarde, en los ensayos posteriores de “Física atómica y conocimiento humano” y “Nuevos ensayos sobre física atómica y conocimiento humano”, consideró que estos paralelismos iban más allá de una mera analogía y los expuso como otras aplicaciones, o consecuencias, de la generalización cuántica del marco clásico⁹¹, a las cuales nos conduce la revisión fundamental de todo el marco conceptual sobre el que descansa nuestro modo habitual de pensar:

“La revisión de los principios, necesaria para una aplicación unívoca de nuestros conceptos elementales a la comprensión de los fenómenos atómicos, tiene un alcance que sobrepasa con mucho el dominio particular de la física. (...) No se trata aquí de analogías más o menos vagas, sino de una investigación de las condiciones necesarias para el uso adecuado de nuestros medios conceptuales de expresión. Tales consideraciones no solo tienden a familiarizarnos con la nueva situación que se presenta en física, sino que, a causa del carácter relativamente sencillo de los problemas atómicos, podrían ser valiosas para precisar en

⁹⁰ Aunque en estos momentos tampoco descarta la posibilidad de que en el futuro estas analogías se conviertan en algo más profundo: “En la última parte del artículo, se hace referencia a determinados problemas psicológicos con un doble propósito. Por una parte, la analogía que presentan ciertos rasgos fundamentales de la teoría cuántica con las leyes de la psicología, nos permiten orientarnos con más facilidad en la situación por completo nueva en la que nos encontramos en la física; por la otra, es a buen seguro legítimo esperar que las enseñanzas sacadas del estudio de los problemas de la física, de naturaleza mucho más sencilla, nos ayudarán también a obtener una visión de conjunto de los problemas, más profundos de la psicología. Como se insiste en el artículo, está claro para el autor que por el momento debemos contentarnos con analogías más o menos apropiadas. Pero muy bien podría suceder que detrás de estas analogías se ocultase, además de una íntima relación de orden epistemológico, una conexión aún más profunda disimulada bajo los problemas fundamentales de la biología que están conectados de manera directa con los dos dominios que comparamos”. BOHR, N., “Introducción” (1929), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, pp. 67-68. Ver también, pp. 140-141; y 155-156.

⁹¹ Cf. FOLSE, H., The Philosophy of Niels Bohr, p. 169.

campos más amplios las condiciones necesarias para una descripción objetiva⁹².

La justificación que encuentra Bohr para proponer esta “unidad del conocimiento”, basada en la idea de la complementariedad, es que *el punto de partida de todas las ciencias experimentales es la observación*, de modo que, la revisión que el postulado cuántico ha impuesto a la noción de observación tiene que influir en el resto de las ciencias⁹³; y estas consideraciones generales sobre cómo la observación puede afectar a la definición y al modo como se aplican los conceptos básicos para obtener una descripción objetiva será lo que tienen en común.

Así, de la misma forma que el ideal de objetividad del marco clásico se extendió a otras áreas de la ciencia fuera de la física, ahora este ideal ha de ser sustituido por la enseñanza epistemológica que ha revelado el desarrollo de la física cuántica acerca de la limitación fundamental del modo de pensar clásico⁹⁴; limitación que, como ya se ha dicho, será extensible en un futuro al uso que ahora se hace de los conceptos en física cuántica. Dicho esto mismo en palabras de Heisenberg: *“Pues (...) no cabe duda de que el desarrollo futuro de la ciencia de la naturaleza obligará a otras revisiones de conceptos, y que, por tanto, los que hoy se emplean sólo tienen también un campo de aplicación que es limitado de un modo que hasta ahora se desconoce”*. Y más adelante: *“Quizá deba decirse, para terminar, que la sospecha de que también los conceptos de la física moderna hayan de revisarse no debe interpretarse como escepticismo; al contrario, no es más*

⁹² BOHR, N., “Introducción”, en: Física atómica y conocimiento humano, p. 3. También en Nuevos ensayos sobre física atómica y conocimiento humano vuelve a negar que estos paralelismos sean analogías, pues son: “ejemplos claros de relaciones lógicas que ^{aparecen} en distintos contextos, en campos más amplios”, p. 10.

⁹³ “La esencia del razonamiento general es que para una descripción objetiva y una síntesis armoniosa es necesario, en casi todos los campos de la ciencia, prestar atención a las circunstancias bajo las cuales se ha efectuado la observación”. BOHR, N., “Introducción”, en: Física atómica y conocimiento humano, p. 4.

⁹⁴ “Como trataré de demostrar, el desarrollo reciente de la física atómica, al mismo tiempo que ha incrementado nuestros conocimientos acerca de los átomos y de su constitución en partes más elementales, ha revelado la limitación de principio de la llamada concepción mecanicista de la Naturaleza, habiendo creado de este modo una nueva perspectiva para el problema, decisivo para nuestro propósito, de lo que se entiende por explicación científica y de lo que puede exigirse de ella”. BOHR, N., “La física y el problema de la vida” (1957), en: Física atómica y conocimiento humano, p. 119.

*que nueva expresión del convencimiento de que la ampliación de nuestro ámbito de experiencia pondrá a la luz armonías siempre nuevas*⁹⁵.

A pesar de todas estas afirmaciones, pienso que no se debería sacar del contexto los paralelismos con la física que encontró Bohr en otras ciencias, pues, aunque sus aspiraciones eran demasiado optimistas a este respecto⁹⁶, su contribución a estas cuestiones fue meramente epistemológica, en tanto que puso de relieve que la enseñanza fundamental, surgida de la física cuántica, tiene un alcance que sobrepasa el dominio de ésta, por poner de manifiesto las dificultades de expresión, a través del lenguaje, que tienen todas las ciencias a la hora de expresar sus avances en el conocimiento⁹⁷, y que este avance ha de implicar un marco teórico cada vez más amplio, donde los conceptos no “estrechen” su significado, sino que lo amplíen⁹⁸.

Si esta tarea no se lleva a cabo, nos encontramos con los pseudoproblemas del tipo que aparecieron en física cuántica acerca de la dualidad o de la imposibilidad de dar un valor exacto y simultáneo a las propiedades dinámicas y cinemáticas. Estas aparentes paradojas aparecieron porque el campo de experiencia se amplió, poniendo de manifiesto la imprecisión y las limitaciones de los conceptos clásicos; pero tal situación se pudo salvar cuando se descubrieron las nuevas relaciones físicas, desde las que se estableció un sistema conceptual distinto del anterior, que ordenó el actual campo de experiencia, recientemente abierto,

⁹⁵ HEISENBERG, W., “Cuestiones de principio de la física moderna”, en: Los nuevos fundamentos de la ciencia, pp. 179 y 191.

⁹⁶ Bohr concibió esta unidad, no sólo como una propuesta gnoseológica, sino también como un proyecto científico, que consistiría en establecer un único marco teórico común a todas las ciencias, que diera cabida a todas las leyes y principios de éstas, para sacar a la luz las relaciones más profundas y armoniosas de la Naturaleza, y que nos servirían para globalizar todo nuestro conocimiento, el cual se ha ido adquiriendo parcialmente a través de aquellas diferentes teorías científicas. Cf. BOHR, N., “Unidad del conocimiento” (1954), en: Física atómica y conocimiento humano, p. 84; y en las páginas 92-93 expone el caso de la biología y la física cuántica, como un ejemplo de esta futura unificación.

⁹⁷ Rosenfeld destaca el trabajo epistemológico de Bohr por encima de su ambicioso programa de unificar las ciencias, y lo resume de esta forma: “the use of language for the objective communication of experience; the ensuing necessity of fixing the unambiguous meaning of words by reference to situations of common experience; and finally, the possible occurrence of a duality of aspects requiring special caution in the use of language to secure unambiguous communication”. ROSENFELD, L., “Niels Bohr's contribution to epistemology”, p. 49.

⁹⁸ Cf. BOHR, N., “Unidad del conocimiento” (1954), en: Física atómica y conocimiento humano, pp. 91-92 y 101.

de forma armónica y consistente, y desde el cual se pudo comprender que tales paradojas sólo eran problemas mal planteados⁹⁹.

Bajo esta fórmula, la complementariedad se convierte en una filosofía de la ciencia en la que se propone, a través de la lección epistemológica, que de ella se desprende, una constante ampliación y revisión de los marcos conceptuales de cualquier disciplina científica, y no sólo física, para avanzar en la evolución del conocimiento humano. Lo cual es posible que jamás nos lleve a una unidad de la ciencia, tal y como Bohr la concibió, pero lo que sí plantea es una nueva propuesta filosófica acerca de cómo se produce y evoluciona el conocimiento que el científico posee de la Naturaleza.

4.3) La Tarea Epistemológica de Bohr

La situación en la que se encuentra la física, tal y como la ve Bohr, impone “hacer un alto” en el camino de la investigación científica antes de proseguir con ella, para reflexionar sobre las cuestiones acerca de los fundamentos filosóficos, sobre los que se levantan las teorías físicas. Este interludio epistemológico no es arbitrario, sino que está justificado por la aparición del postulado cuántico, el cual obliga a realizar una ampliación o generalización del antiguo marco conceptual. Así, la complementariedad es una *consecuencia racional*, que surge de la necesidad de combinar el rasgo de discontinuidad del postulado cuántico con el marco clásico.

a) Ampliación del nuevo marco conceptual

En una rápida recapitulación de lo dicho hasta ahora se ha de acentuar el hecho de que la idea de *generalización* es fundamental, sin ella

⁹⁹ “Establecer el punto en que es lógicamente posible separarse de los conceptos clásicos constituye siempre el verdadero problema de una teoría moderna. (...) la cuestión de la “efectiva simultaneidad” de dos acontecimientos y la cuestión de la posición exacta y del impulso exacto de una partícula son seudoproblemas. En realidad, esta formulación contiene la quintaesencia lógica de la actual situación, por expresar del modo más claro que los conceptos con que nos vemos obligados a expresar nuestras experiencias son demasiado imprecisos para dar cuenta de la situación que en la naturaleza se presenta. Por lo demás aquí no importa tanto comprobar que existen problemas aparentes como aclarar por qué existen”. HEISENBERG, W., “Cuestiones de principio de la física moderna”, en: Los nuevos fundamentos de la ciencia, pp. 182-183.

no se puede concebir la complementariedad. La razón de esto es que Bohr necesita establecer que todas las nociones, imágenes, descripciones y fenómenos clásicos son “compatibles” con los cuánticos. Para ello afirma que los primeros son idealizaciones, o abstracciones, casos particulares cuya validez queda restringida bajo ciertas condiciones, en las que precisamente se excluyen las circunstancias propias de los fenómenos cuánticos. En esta afirmación es tan importante el aspecto positivo como el negativo, ya que, si bien su valor es restringido, una cierta validez sí que conservan. Esta validez, para Bohr, es imprescindible por la razón de que los únicos conceptos descriptivos son los clásicos: sólo podemos describir la experiencia a través de ellos, porque así es como percibimos el mundo, así es como éste se nos manifiesta, y, por tanto, son insustituibles para dotar de contenido físico o empírico a la teoría cuántica; es decir, para *describir la experiencia* que es el objetivo de la física. Pero, el hecho de descubrir que estos conceptos se han vuelto ambiguos, al aplicarlos a los fenómenos atómicos en una ampliación de nuestra experiencia, nos revela que su validez es restringida. Lo cual obliga a cambiar algo y este algo, como no pueden ser los conceptos mismos¹⁰⁰, han de ser las relaciones de estos conceptos dentro del marco teórico en que se encuentran y el uso que hacemos de ellos, tal y como establece la lección epistemológica.

El reconocimiento de la realidad del problema de la dualidad entre el modelo de onda y el de partícula¹⁰¹ es el primer paso que da Bohr hasta llegar a exponer su nuevo marco conceptual para la física cuántica, además de la búsqueda que inició para encontrar el “punto exacto donde el ideal descriptivo se rompe”, estimulado por el éxito de la mecánica matricial¹⁰².

“Estaba convencido de que la teoría cuántica sería desarrollada intentando descubrir las restricciones apropiadas a las leyes de la mecánica clásica que tuvieran en cuenta el cuanto de acción. Aquello que no requirió fue una sustitución completa de los conceptos de las teorías clásicas. Al principio de los años veinte, no obstante, reconoció que introducir algunas condiciones restrictivas dentro de la mecánica clásica era un acercamiento demasiado fragmentario, y que aquello que

¹⁰⁰ Pues, como ya expliqué en su momento, nos quedaríamos sin elementos descriptivos.

¹⁰¹ Problema que rechazó en un principio porque no consideró que el modelo de partícula para la luz (fotones) tuviera realidad física, pero que fue aceptando paulativamente, al fracasar su intento de conectar la física clásica con el postulado cuántico, y al desarrollarse un formalismo matemático independiente de las teorías clásicas.

¹⁰² Cf. FOLSE, H., The philosophy of Niels Bohr, p. 80.

se requería era un nuevo tipo de leyes que gobernarán el uso de los conceptos clásicos, una única y sistemática generalización de la mecánica clásica. Vio a la mecánica cuántica como la consumación de este deseo”¹⁰³.

Más atrás ya apunté que la tesis de ampliar el marco conceptual parte de dos ideas básicas: por un lado, la discontinuidad cuántica y, por otro, la imprescindibilidad de las nociones clásicas. Esta última se caracteriza, a su vez, por dos elementos: idealización y limitación (o estrechez) de los conceptos clásicos. Por ello, el contenido general de esta idea de ampliación del marco es que todos los conceptos clásicos, que se fundamentaban en la continuidad, son el resultado de un proceso de abstracción o idealización de las condiciones cuánticas, muy diferentes de las clásicas, a la luz de las cuales aquellos conceptos se nos revelan no falsos sino, más bien, limitados en su validez y aplicabilidad.

Esta limitación clásica en la que se ignoran las condiciones cuánticas, es la que sugiere que el nuevo marco sea una generalización del anterior, pues la física cuántica no sustituye a la clásica en el dominio de ésta, sólo la contempla como un caso particular de una teoría más general, que pretende explicar los fenómenos cuánticos y dar cuenta del hecho de que se produzcan fenómenos clásicos en la escala humana. Esto permite considerar aquellos conceptos físicos fundamentales, definidos desde la discontinuidad cuántica, como una generalización o ampliación de esos conceptos entendidos al modo clásico.

Además, el nuevo marco no podrá sustituir sin más al marco de la causalidad, porque éste contiene los dos aspectos descriptivos de la realidad de los que no podemos prescindir a la hora de hacer física: contenido físico y objetividad. Ha de hacer algo más sutil si quiere conservar ambas descripciones: ha de ser una generalización del marco anterior en la que se ponga de manifiesto las limitaciones de la física clásica al carecer de las condiciones cuánticas. El único sacrificio será el tener que contentarse con las imágenes imprecisas de unos conceptos no representativos de la realidad (pero sí simbólicos), con una descripción estadística basada en una causalidad débil que jamás permitirá llevar a cabo el ideal determinista, y, por tanto conformarse con una incierta previsibilidad de los fenómenos cuánticos¹⁰⁴.

¹⁰³ MURDOCH, D., *Niels Bohr's Philosophy of Physics*, p. 42.

¹⁰⁴ “(...) una mecánica cuántica coherente que pueda ser considerada como la generalización natural de la mecánica clásica, pero que reemplaza el encadenamiento causal de esta última por un tipo de descripción fundamentalmente estadístico”. BOHR, N., “La teoría atómica y los

En cuanto a la sustitución, se cambiará la aplicabilidad ilimitada y continua de los principios dinámicos de conservación¹⁰⁵ por el uso restringido por las condiciones cuánticas, que impone el formalismo matemático de la manera que expuse en su momento, y desde el cual se podrá dar una reinterpretación de los conceptos clásicos en el marco de la teoría cuántica y una única descripción de los fenómenos atómicos, completa y objetiva, aunque no en sentido clásico. Esa “aplicabilidad ilimitada”, de la que disfrutaban en el antiguo marco, quedará restringida al área de las idealizaciones de los fenómenos cuánticos. Mientras que aquella utilización limitada de los principios de conservación lo que supone es que el supuesto clásico de la continuidad ha perdido su lugar central en el marco teórico, como soporte conceptual de los ideales clásicos y del significado y el uso de las nociones que en él se inscriben.

Ahora es la idea de discontinuidad desde la que se habrá de edificar un nuevo marco, y desde la que reinterpretar todos los conceptos de la física. Por esto, se debe aceptar la propuesta de ser una ampliación, ya que desde esta idea pueden contemplarse todos los elementos conceptuales de la complementariedad desde el mismo panorama, aportando a este nuevo marco la coherencia y unidad internas necesarias para que se le considere una teoría física consistente.

En consecuencia, los conceptos de la física clásica, en tanto que fueron previamente refinados, o modelados, por los postulados de la teoría, se presentan también como idealizaciones en este mismo sentido, ya que ellos están contruidos sobre la base de la continuidad en las variaciones de energía donde el cuanto de acción sería igual a cero¹⁰⁶. De ahí que se necesite una revisión de los conceptos, en la que se analice su significado en profundidad, llegando hasta la base conceptual de la teoría, desde la que se impone el uso que podemos hacer de ellos. Es decir, hay que partir de un análisis de los postulados teóricos, pues son ellos los que establecen las

principios fundamentales de la descripción de la naturaleza” (1929), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, p. 149.

¹⁰⁵ Por tanto, el principio de causalidad tendrá que mantener otro tipo de relación dentro del nuevo marco, pues ha perdido su uso riguroso y de capital importancia, en el que se le llegaba a identificar con todo el marco clásico.

¹⁰⁶ “Classical mechanics is an idealization in the sense (among others) that it presupposes that the quantum the action is zero. Similarly, our *forms of perception*, and many of the classical physical concepts, are idealizations in that they are valid only under special conditions”. MURDOCH, D., Niels Bohr's Philosophy of Physics, p. 42.

condiciones de aplicabilidad de los conceptos vigentes, garantizando la validez de su significado y del uso que la teoría hace de ellos¹⁰⁷.

Así, el determinismo causal es considerado por Bohr como un caso límite de la causalidad estadística pues aquél sólo puede defenderse cuando tratamos con cantidades muy superiores a h , lo cual nos permite ignorar experimentalmente el valor del cuanto de acción por ser muy pequeño en relación a estos grandes números¹⁰⁸.

De esta misma forma, el aspecto de continuidad en general que se percibe en las grandes escalas puede explicarse desde la discontinuidad como el resultado de que las probabilidades estadísticas aumentan dando esa apariencia de continuidad; y como la continuidad no puede explicar la discontinuidad, ésta se presenta como un hecho más básico que la anterior, de tal modo que es posible considerar la continuidad como un *caso límite* de la discontinuidad.

Estas revisiones serán siempre generalizaciones del marco que le precede y, a pesar de que estos marcos son construidos por los científicos en una empresa, más que científica, epistemológica, es la Naturaleza en última instancia la que demanda el tipo de generalización que ha de hacerse¹⁰⁹. Esta demanda se da a conocer a través de la teoría física; es ésta la que informa acerca de los requisitos que la realidad natural nos impone para poder describirla de manera consistente y sin ambigüedades, es decir, “objetivamente”¹¹⁰. Por ello el marco complementario es una *consecuencia*

¹⁰⁷ Ésta es una de las enseñanzas de la “lección epistemológica”.

¹⁰⁸ El espacio euclídeo, caracterizado por la continuidad, puede explicarse como otro caso límite de idealización dentro de las geometrías no euclídeas, cuando se hace abstracción de los efectos energéticos sobre el espacio, así como también se puede considerar el encadenamiento causal o los cambios en los procesos energéticos.

¹⁰⁹ “La gran ampliación del campo de nuestra experiencia en estos últimos años ha sacado a la luz la insuficiencia de nuestras simples concepciones mecánicas y, como consecuencia, ha sacudido los fundamentos en los cuales se basaba la interpretación usual de las observaciones, arrojando así nueva luz sobre los viejos problemas filosóficos. Esto es cierto no sólo en lo que a la revisión de los fundamentos del modo de descripción espacio-temporal producida por la teoría de la relatividad se refiere, sino también a la renovada discusión del principio de causalidad a la que ha dado lugar el desarrollo de la teoría cuántica”. BOHR, N., “Introducción” (1929), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, p. 53.

¹¹⁰ Aunque, en este mismo sentido, es la Naturaleza la que determina el significado de término “objetivo”: “Thus it is nature, the object of description in science, which determines the objectivity of a description by forcing science to remold its frameworks in accord with new presuppositions for unambiguous communication which we learn as our experience of nature expands into new fields.

racional del propio esquema matemático de la teoría cuántica, en el sentido de que pretende “imitar” la flexibilidad de su formalismo. De ahí que la interpretación de Bohr no se aparte de las matemáticas de la teoría, sino que se adentra en ellas para explicitar en el nivel conceptual aquellas características, que en el nivel formal o matemático hicieron posible la unión de lo clásicamente incompatible y la desvinculación de lo clásicamente incompatible. Su confianza en el formalismo es absoluta: si en él esta situación no crea problemas, también él debe dar la clave para comprenderla al establecer las condiciones que el nivel conceptual o epistemológico debe seguir para disolver las dificultades que en él surgieron:

“Esta nueva mecánica, llamada cuántica, (...) aparte de su asombrosa fecundidad en todos los dominios de la física atómica y de la química, ha aclarado en su esencia la base epistemológica del análisis y síntesis de los fenómenos atómicos. La revisión del problema de la observación, iniciada por Heisenberg al introducir su principio de indeterminación, ha conducido a descubrir condiciones previas, no tenidas en cuenta hasta entonces, para el uso inequívoco de los conceptos más elementales sobre los cuales se basa nuestra descripción de los fenómenos naturales”¹¹¹.

Así, se ha visto que la propuesta de Bohr de ampliar el marco conceptual posee una gran consistencia interna, ya que se basa en dos ideas fundamentales de las que se deriva todo el resto del entramado lógico. Estas dos ideas son: la noción de *discontinuidad* y la de *limitación clásica* por tratar con idealizaciones. La primera la propone como el supuesto que sirve de base para el uso de los conceptos dentro de la teoría, con el que pretende evitar la ambigüedad que su uso definido desde la continuidad clásica provoca en la física cuántica. De la segunda se derivan los argumentos que expone Bohr para considerar el nuevo marco como una ampliación o generalización del antiguo.

En el fondo de estas consideraciones yacían sus reflexiones acerca del problema de la dualidad entre lo continuo y lo discontinuo. Consideró que los conceptos descriptivos de onda y partícula podían ser contemplados

As a consequence of this view, the “objectivity” of a description becomes the ultimate criterion guiding any revision of a framework undertaken as a result of adopting new presuppositions about nature”. FOLSE, H., *The Philosophy of Niels Bohr*, p. 16.

¹¹¹ BOHR, N., “Biología y física atómica” (1937), en: Física atómica y conocimiento humano, p. 23

como un caso especial de un marco conceptual más amplio que pudiera ser pensado como una generalización del marco clásico¹¹², por tanto, tendrán el uso limitado, al que me referí anteriormente, por el concepto de *idealización* y de *analogía*, presentes en el principio de correspondencia.

En cambio, la actitud de Heisenberg ante el problema de la dualidad y de la descripción espacio-temporal fue mucho más radical que la de Bohr: él partió, en un principio, de la renuncia absoluta a este tipo de descripción e ignoró el problema de la dualidad.

Para comprender correctamente el significado de la complementariedad, es importante tener en cuenta el desacuerdo entre Heisenberg y Bohr respecto a este punto, ya que la complementariedad es el intento que finalmente realizó Bohr para comprender las propiedades fenoménicas de los sistemas atómicos como entidades reales¹¹³. Comprensión que requiere la necesidad de un vínculo conceptual entre el formalismo matemático y la descripción física de los procesos atómicos, respetando, de esta manera, el ideal descriptivo y explicativo de la ciencia moderna. En relación con esto, estoy totalmente de acuerdo con Folse cuando afirma:

“Bohr comprendió más profundamente que Heisenberg que la descripción científica de la Naturaleza requiere algo más que un formalismo matemático para la predicción de los fenómenos observados. Con el objeto de comprender cómo aplicar el formalismo matemático para obtener predicciones de aquello que sea observado, es necesario ser capaz de representar conceptualmente lo que ocurre en las interacciones físicas que son descritas como “observaciones” que determinan las propiedades de los sistemas atómicos”¹¹⁴.

Cuando Bohr convenció a Heisenberg de esta necesidad, Heisenberg ofreció su propia solución al problema a través de sus “relaciones de indeterminación”, casi al mismo tiempo que lo hizo Bohr con su formulación de la “complementariedad onda-corpúsculo”.

Aquella necesidad llevará a ambos a la búsqueda de un lenguaje intuitivo al que poder traducir el lenguaje matemático de este formalismo no-clásico; pero, como esta búsqueda se tuvo que realizar indagando en las posibilidades de *observación* y de *definición*, el punto de partida es

¹¹² Cf. FOLSE, H., The philosophy of Niels Bohr, pp. 100-101.

¹¹³ Cf. *Ibid*, p. 81.

¹¹⁴ FOLSE, H., The philosophy of Niels Bohr, p. 80.

fenomenista (o también llamado “observacionalista”). Esta postura inicial es inevitable, pues de la conjugación de ambas posibilidades ha de salir el tipo de descripción mecánica que nos permitiría el mundo atómico, en la que se conservara algún tipo de descripción espacio-temporal compatible con la discontinuidad cuántica.

b) Su fenomenismo como punto de partida: teoría de la medida y noción de observación y de fenómeno

La circunstancia de que ambas magnitudes, en el caso del principio de Heisenberg, o descripciones, si hablamos de la complementariedad, sean mutuamente excluyentes se basa en *dos consideraciones sobre la situación experimental* que se da en el dominio de los fenómenos cuánticos.

Una de ellas es que la medida de estas propiedades requiere un dispositivo experimental diferente para cada una, dispositivos que implican procedimientos de medida que son experimentalmente incompatibles, en tanto que uno excluye siempre al otro¹¹⁵.

La otra es que la imposibilidad de determinar el valor de la interacción observacional entre el sistema bajo observación y esos dispositivos impide extrapolar con exactitud y simultáneamente los resultados de las dos mediciones: esta imposibilidad es la que ya se vio como consecuencia de la introducción del cuanto de acción en los procesos de interacciones energéticas entre radiación y materia.

Esto último fue lo que provocó el problema de la medición cuántica, expuesto en el tercer capítulo, en tanto que la interacción observacional es un intercambio de energía y momento entre el objeto y el instrumento de medida, cuyo valor distinto de cero no es determinable por principio, y por tanto este valor ni es despreciable ni calculable. Por lo cual, el problema de

¹¹⁵ La situación se resume así: “... for classical physics the calculation of the mechanical causal influence of one system on another system is possible only through the two conservation principles of momentum and energy. In quantum physics this dynamical picture of an interaction may be retained, indeed it must be retained in order to mathematically account for a measurement which is a physical interaction of a special sort. However, the retention of such a conceptual representation of physical systems in quantum theory forces the abandonment of spatio-temporal representation of such systems necessary to characterize them as isolated at determinate spatio-temporal loci. Since this latter representation of the physical systems is defined classically as the “state of the system” the mode of representation of systems independent of observation, i. e. as isolated from an observational situation, is complementary to the actual interaction necessary to observe such systems”. FOLSE, H., “Kantian Aspects of Complementarity”, p. 62.

la observación está estrechamente relacionado no sólo con el problema de la descripción objetiva, cuya caracterización depende directamente de la noción de observación que se esté usando, sino también con el problema de la descripción mecánicamente completa.

“Nuestra posición como observadores en un dominio de experiencia donde la aplicación inambigua de los conceptos depende esencialmente de las condiciones de la observación demanda el uso de descripciones complementarias si la descripción está siendo exhaustiva”¹¹⁶.

La teoría de la medida que expone Bohr aclara que la incompatibilidad entre los dispositivos experimentales se debe a una importante diferencia en el procedimiento de medida de las magnitudes dinámicas entre la física clásica y la cuántica. Bohr puso de relieve que en física clásica la determinación de estas propiedades puede ser realizada en función de las medidas espacio-temporales porque, la interacción, que toda observación supone, puede ser despreciada o calculada; en cambio, la física cuántica no puede definir el estado de un sistema a partir de observaciones sobre su posición o su movimiento, pues para conocer su estado dinámico se debe renunciar a su descripción espacio-temporal, que ha quedado indeterminada, dado que la medición de las magnitudes dinámicas requiere una interacción causal para realizar tal medida, a través del uso de las leyes de conservación, lo cual excluye las posibilidades de observación, ya que ésta exige que se dé una interacción entre el objeto y los instrumentos, que en física cuántica es indeterminable en función de la presencia de h en toda interacción¹¹⁷. Por ejemplo, en cuanto al momento magnético dice Bohr:

“... no es posible detectar el momento magnético del electrón por medio de experimentos que se basen de manera directa en la observación de su movimiento. La diferencia que encontramos aquí entre electrones simples y átomos está relacionada con el hecho de que las medidas del momento magnético de los átomos implican la renuncia conforme a las reglas generales de aplicación del concepto de estado estacionario, a todo intento de seguir los movimientos de las partículas elementales”¹¹⁸.

¹¹⁶ HONNER, J., The description of nature, p. 92; también, p. 104 y p. 105. Este punto Honner lo considera como uno de los pasos fundamentales en la argumentación de Bohr.

¹¹⁷ Cf. BOHR, N., Física atómica y conocimiento humano, pp. 24 y 108-109.

¹¹⁸ BOHR, N., “Introducción” (1929), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, p. 62.

Así como también afirma lo siguiente en relación con la velocidad:

“En realidad, puede medirse la posición de un «individuo» en dos instantes diferentes con una precisión tan grande como se desee, pero si a partir de tales medidas queremos deducir de la manera ordinaria la velocidad del «individuo» en el intervalo que separa esos dos instantes no queda más remedio que recurrir a una idealización de la que no se puede obtener información inequívoca alguna relativa al comportamiento previo o futuro del «individuo»¹¹⁹.

La consecuencia, o más bien, la explicación, de esto es que el empleo de las leyes de conservación del momento, o de la energía del objeto, para tales magnitudes, requiere que el momento, o la energía, del instrumento sea conocido y que el cambio en él, debido a la interacción con el objeto, pueda ser medido; pero esto sólo puede conseguirse si el instrumento de medida no está rígidamente sujeto al marco de referencia espacio-temporal; pero, esta falta de sujeción al marco espacio-temporal es, además, la responsable de que su posición y su tiempo estén indeterminadas.

Por tanto, la condición para definir las propiedades dinámicas es incompatible con la determinación de las coordenadas espacio-temporales del objeto, la cual requiere, por su parte, que el aparato esté rígidamente sujeto a la estructura del marco de referencia del espacio-tiempo¹²⁰.

¹¹⁹ BOHR, N., “El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica” (1927), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, pp. 110-111. Y continúa diciendo en la página siguiente: “... según la teoría clásica, toda nueva observación permite predecir el curso de los fenómenos con una precisión cada vez mayor, dado que nos proporciona un conocimiento gradual y más exacto del estado inicial del sistema. Por el contrario, en la teoría cuántica cada observación introduce un elemento por completo nuevo e incontrolable, como consecuencia de la imposibilidad de despreocuparse de la interacción con el instrumento de medida. En efecto, las consideraciones precedentes muestran que la medida de las coordenadas de posición de una partícula no implica sólo una modificación finita de las variables dinámicas, sino que entraña siempre una ruptura completa en la descripción causal de su comportamiento dinámico. Asimismo, la determinación de su cantidad de movimiento implica siempre una laguna en el conocimiento de su propagación espacial. Este es justo el estado de cosas que traduce con claridad el carácter complementario de la descripción cuántica de los fenómenos atómicos, carácter que aparece como una consecuencia inevitable del antagonismo que existe entre el postulado cuántico y la distinción -inherente a la idea misma de observación- entre objeto e instrumento de medida”.

¹²⁰ Cf. JAMMER, M., The Philosophy of Quantum Mechanics, p. 96: “For Bohr's principle of complementarity it was the experimental setup of a micro-object (photon-electron)

Esta circunstancia, referente a que la medida de una de las magnitudes dinámicas requiere que el instrumento que la mida no esté rígidamente unido a la estructura que define el marco de su respectivo par cinemático, explica la incompatibilidad experimental de los aparatos que las miden.

Pero no da una explicación completa de relación de indeterminación que expresa el principio de Heisenberg; para esto, hay que tener en cuenta el otro factor¹²¹. Éste es el de la imposibilidad de determinar el valor de la interacción observacional cuando se intenta medir, por ejemplo, la posición, ya que todo acto de medida implica un intercambio de energía y de momento entre el objeto y el instrumento y, como éste ha de estar rígidamente unido al marco de referencia espacial, no podrá saberse qué cantidad de energía y de momento ha ganado o perdido el instrumento y el objeto. La interacción observacional en física cuántica no puede ser despreciada o ignorada como demanda el ideal clásico de observación porque, en palabras del propio Bohr:

passing through a slit in a diaphragm. If in this arrangement the diaphragm is rigidly connected with the frame of the local coordinate system of scales and clocks, the position of the micro-object (up to the, in principle, arbitrarily small width of the slit) is ascertainable, whereas any information concerning the exact energy or momentum exchange between the micro-object and the diaphragm is lost owing to the rigid connection of the diaphragm with the frame. If, on the other hand, the diaphragm with its slit is suspended by weak springs, the momentum transfer (manifested by the motion of the diaphragm of known mass) is ascertainable, whereas any information concerning the exact position of the passing micro-object is forgone owing to the indeterminate location of the diaphragm. Generalizing this result Bohr contended that descriptions in terms of space-time coordinates and descriptions in terms of energy-momentum transfers or, more briefly, spatiotemporal and causal descriptions cannot both be operationally significant at the same time, since they require mutually exclusive experimental arrangements”.

¹²¹ “There are, then, two factors which account for the mutual exclusiveness of exact simultaneous measurements of position and momentum. First, the mutual exclusiveness of the measurement arrangements: the one measurement requires a fixed instrument, the other a loose instrument. This factor is not wholly independent of quantum considerations, since it depends on the fact that, owing to the disturbance of an object entailed by the measuring process, measurement of the momentum of an object requires application of the conservation laws. The second factor is the indeterminable disturbance of the object; and this is a consequence of the quantum of action. Each factor alone would not give rise to mutual exclusiveness; but together they do. In this way Bohr explains the precise role which the quantum of action plays in the uncertainty principle -in kinematic-dynamic complementarity”. MURDOCH, D., Niels Bohr's Philosophy of Physics, p. 86.

“(…) todo intento de coordinación espacio-temporal entraña una rotura de la cadena causal, dado que semejante intento está íntimamente conectado a un intercambio esencial de energía y cantidad de movimiento entre los «individuos» y las reglas y los relojes utilizados para la observación que no puede ser tomado en consideración si deseamos que los instrumentos de medida desempeñen la función para la que fueron contruidos. A la inversa, cualquier conclusión relativa al comportamiento dinámico de los «individuos» basada de forma inequívoca en la conservación estricta de la energía y de la cantidad de movimiento implica de manera evidente la renuncia total a seguir su evolución en el espacio y en el tiempo. En general, podemos decir que la conveniencia del modo de descripción causal y espacio-temporal para coordinar nuestras experiencias ordinarias depende sólo de la pequeñez del cuanto de acción frente a las acciones que entran en juego en los fenómenos habituales”¹²².

Lo cual implica que no se puede extrapolar el resultado de una medición de la posición al resultado de otra medida hecha posteriormente acerca del momento.

“Uno podría preguntarse, por ejemplo, si en la determinación de la posición de una partícula por medio de un instrumento óptico, no sería posible deducir la cantidad de movimiento cedida a la partícula en la difusión con la ayuda del teorema de conservación midiendo la variación de la cantidad de movimiento del microscopio -incluyendo en él la fuente de luz y la placa fotográfica- durante el proceso de observación. Una investigación más detallada muestra, sin embargo, que semejante medida es imposible si al mismo tiempo se desea conocer la posición del microscopio con suficiente exactitud. En realidad, a partir del conjunto de hechos que se expresan por la teoría ondulatoria de la materia resulta que la posición del centro de gravedad de un cuerpo y su cantidad de movimiento total sólo pueden ser definidas dentro de los límites de precisión recíproca dados por la relación (2)”¹²³.

Esta circunstancia del proceso observacional se debe a que no es posible establecer una clara distinción entre el objeto observado y el

¹²² BOHR, N., “El cuanto de acción y la descripción de la naturaleza” (1929), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, p. 138; ver también: pp. 151-152, y en Física atómica y conocimiento humano, p. 24.

¹²³ BOHR, N., “El postulado cuántico y el desarrollo reciente de la teoría atómica” (1927), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, pp. 111-112.

instrumento de medida¹²⁴. La interacción de la medida sólo puede ser determinada en el caso en que el aparato de observación abandone su función de medir y se convierta él mismo en el objeto de la observación, de modo que la indeterminación de la interacción se produce sólo en el caso de que se utilice como parte del proceso de observación y medida; pero, en el caso de que se vuelva objeto de investigación, producimos un nuevo fenómeno sujeto a las mismas condiciones experimentales de antes. De ahí que Bohr hable del carácter de totalidad e integridad de las condiciones observacionales y de la indivisibilidad de los fenómenos cuánticos, en el sentido de una *totalidad orgánica*¹²⁵. Éste fue el camino que condujo a Bohr hasta la idea de que la noción clásica de observación es una idealización.

Bohr llegó a considerar la noción clásica de observación como la idealización de una clara distinción entre el objeto y el instrumento, que no puede seguir manteniéndose en física cuántica, en tanto que el cuanto de acción impide la posibilidad de determinar el valor de la interacción observacional, y de hacer esta distinción¹²⁶. Esta idealización que realiza la noción clásica de observación es, además, la causa de que los conceptos de nuestra experiencia ordinaria fallen:

“Una distinción definida entre el sujeto y el objeto es, afirma Bohr, una precondition de la posibilidad de la observación y del conocimiento de un mundo objetivo: cuando esa condición no puede mantenerse,

¹²⁴ “Sin embargo, para entender por qué es imposible llevar adelante una descripción causal es esencial recordar (...) que la magnitud de la perturbación causada por la medida no puede jamás ser determinada, ya que la limitación considerada afecta a toda aplicación de los conceptos mecánicos y, por consiguiente, se aplica tanto a los instrumentos de observación como a los fenómenos investigados. Esta es precisamente la razón por la cual toda observación se hace a expensas de la conexión entre el curso de los fenómenos antes y el curso de los fenómenos después de la observación. Como he dicho ya, *la magnitud finita del cuanto de acción impide hacer una distinción neta entre el fenómeno y el instrumento de observación*, distinción que subyace al concepto ordinario de observación y que por lo tanto está en la base de las ideas clásicas del movimiento”. BOHR, N., “Introducción”, en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, pp. 60-61. Ver también: pp. 55 y 59.

¹²⁵ “(...) the object and the instrument in mutual inteaction form an organic whole in that the parts of the whole are intimately bound up together in causal interrelations”. MURDOCH, D., Niels Bohr's Philosophy of Physics, p. 94.

¹²⁶ “Evidentemente, la estructura conceptual total de la física clásica (...) se basa en la hipótesis, bien adaptada a nuestra experiencia diaria de los fenómenos físicos, de que es posible distinguir entre el comportamiento de los objetos naturales y su observación”. BOHR, N., Física atómica y conocimiento humano, p. 25; ver también: p. 32.

nuestras formas ordinarias de percepción, las cuales son además las condiciones de la experiencia perceptual de un mundo físico objetivo, dejan de ser aplicables, y las palabras 'observación' y 'objeto' pierden su sentido ordinario (clásico)"¹²⁷.

Así pues, es esta unión entre el sujeto y el objeto, que afecta no sólo a nuestras formas de percepción, sino también al esquema conceptual del mundo objetivo que ellas conforman, la que limita las posibilidades de obtener conceptos bien definidos para describir los objetos atómicos. Pero, además, es la razón de que el principio de incertidumbre tenga un valor objetivo, en tanto que se refiere no sólo a nuestro acto de medición, sino también a una característica de la Naturaleza¹²⁸. Sin embargo, lo que sí se puede es establecer una *distinción arbitraria* con el objeto de que la observación no pierda su sentido, aunque bajo las condiciones especiales de la medición cuántica, las cuales establecen una restricción en las posibilidades de la noción clásica de observación.

Esta situación, similar a las otras idealizaciones clásicas que fueron desenmascarándose en el dominio de la microfísica, lleva a la misma consideración que aquéllas: la observación en física cuántica será "*una generalización de la observación en sentido clásico, en la que el cuanto de acción impone una restricción al alcance de la observación, y también en el sentido de que, de entre las dos condiciones de la observación -una clara distinción entre el objeto y el instrumento, y ninguna perturbación del primero por el último- sólo una es satisfecha, la llamada clara distinción teórica*"¹²⁹, o arbitraria. En consecuencia, la noción de observación, que Bohr propuso desde su teoría de la medida, es equivalente al término "fenómeno", que acuñó más tarde, en el siguiente sentido:

"Después de 1939 empleó la palabra "fenómeno" para referirse sólo a la observación obtenida bajo circunstancias cuya descripción incluye una explicación de la totalidad del dispositivo experimental. (...) En el uso posterior que hizo Bohr de 'fenómeno', por tanto, el término es equivalente al de 'observación', que él usa para denotar una interacción

¹²⁷ MURDOCH, D., Niels Bohr's Philosophy of Physics, p. 95.

¹²⁸ "Lo que el principio de incertidumbre plantea es que, de acuerdo a la ecuación fundamental de la mecánica cuántica, no existen cosas tales como un electrón poseyendo simultáneamente una posición precisa y un momento preciso". GRIBBIN, J., En busca del gato de Schrödinger, pp. 136-137.

¹²⁹ MURDOCH, D., Niels Bohr's Philosophy of Physics, p. 97.

entre un sistema cuántico y los instrumentos usados para medir y observar”¹³⁰.

Sólo así, si se parte de esta concepción del *fenómeno* como *unidad mínima de observación*, y del marco teórico como resultado de nuestra observación experimental de la naturaleza¹³¹, podría afirmarse que “*la teoría establece lo que podemos observar*” porque es aquélla la que ya lleva intrínsecamente la conexión entre Naturaleza y marco teórico que no podemos separar.

Por otro lado, añadiría que el fenómeno también es la *unidad mínima de explicación*, dado que pretender explicar algo que está más allá de él es salirse de esta concepción que Bohr ofrece de la naturaleza de la teoría física. Aquello sería pretender separar el sujeto del objeto, caso que el postulado cuántico establece que es imposible, lo cual implicaría una separación tajante entre teoría y Naturaleza¹³².

De esta unión indivisible, integral, surgen los marcos conceptuales, que después se utilizan para explicar aquello que se ha observado. En este sentido, pienso que se podría afirmar lo siguiente: mientras que el origen de los marcos teóricos está en nuestra observación experimental de la Naturaleza, su aplicación como tal nos explica, o describe, la naturaleza de lo que hemos observado.

No obstante, aunque Bohr afirme con vehemencia que la observación que permite la física cuántica es perfectamente objetiva, en el siguiente apartado podrá comprobarse que no sólo se refiere a la intersubjetividad e inambigüedad de la información. Hasta ahora se ha visto fundamentalmente la “*mitad de la historia*”, como dice Honner, en tanto que me he centrado en el nivel epistémico del principio de Heisenberg desde el que Bohr desarrolló su teoría de la medida¹³³. Es desde este nivel

¹³⁰ HONNER, J., *The description of nature*, pp. 68-69.

¹³¹ Cf. *Ibid*, p. 51.

¹³² Una separación así origina el problema de cómo se conectan ambas después para dar lugar al conocimiento. En una postura clásicamente realista esta conexión se busca postulando un isomorfismo entre la teoría y la Naturaleza, entre lenguaje y realidad, para establecer un representacionismo pictórico entre los conceptos físicos y la Naturaleza. Pero este problema es ajeno a la concepción de Bohr, porque en el origen del uso y significado de los conceptos físicos ya está establecida la conexión con la Naturaleza, pues surgen como resultado de nuestra observación sobre ella, conformándose como dos términos que ya no podrán ser concebidos por separado.

¹³³ Cf. MURDOCH, D., *Niels Bohr's Philosophy of Physics*, p. 80.

desde el que se le atribuye a Bohr una postura fenomenista, y es cierto que en él se disuelve parte del problema de la dualidad onda-corpúsculo, en tanto que las características corpusculares y ondulatorias se refieren a propiedades fenoménicas, en las que se debe incluir la descripción de las condiciones experimentales.

Sin embargo, el estudio que he realizado de las tesis de Bohr me ha llevado a concluir que defendió esta postura sólo como contrapunto al término clásico de objetividad, como la descripción de una realidad independiente; estas propiedades fenoménicas también se refieren de algún modo a los objetos atómicos en el contexto de una teoría del conocimiento diferente a la que supone el marco clásico, y en la que el conocimiento físico no se produce como un reflejo de la realidad en nuestra mente, sino más bien por participación¹³⁴: en este tipo de contexto, se ha de advertir que ya no se estaría discutiendo sobre la “objetividad” sino acerca del realismo de la ciencia y, por ende, del realismo de la física cuántica; cuestión que he de dejar de momento de lado, para retomarla más adelante, pero a continuación expondré cómo la tesis semántica, que se defiende en la filosofía de la complementariedad, se opone al fenomenismo radical, apuntando en la dirección del realismo.

c) La tesis semántica de Bohr

Entre los autores que interpretan la filosofía de la complementariedad de Bohr hay dos grupos generales: aquéllos que le consideran un pensador fenomenista, u observacionalista, de lo cual se deriva que la física cuántica es únicamente una teoría con valor instrumentalista, y otros que defienden su postura realista, pero basada en una revisión de las nociones de “realidad”, de materia y de objetos, por lo tanto, se ha de aceptar una nueva concepción de realismo, de ontología, de conocimiento científico y del tipo de descripción física con la que se puede contar a la hora de aprehender y conectar con esa realidad material a través de la teoría, esto es, un nuevo modelo de inteligibilidad.

En otras palabras, la importancia que tiene la cuestión del contenido intuitivo en Bohr es que saca a la luz los tres elementos fundamentales que, en la polémica acerca del realismo de la física cuántica y de la interpretación de Bohr, direccionan el sentido de la flecha hacia el realismo, alejándose del fenomenismo radical; aquéllos son: su **tesis**

¹³⁴ Cf. HONNER, J., The description of nature, p. 68.

semántica, el **compromiso ontológico**, que la anterior conlleva, y el **nuevo modelo de inteligibilidad** que Bohr propone¹³⁵.

La postura que defiende aquí sobre la interpretación de Bohr del formalismo cuántico es que se trata de una interpretación “realista”, pero en la cual sólo se postula y se supone que existe una legalidad externa, la cual se nos impone a pesar del fenomenismo, desde el que inicia la solución a los problemas epistemológicos de la microfísica. Es decir, cuando Bohr se sitúa en una postura realista, no es la del materialismo clásico y el problema es que no se adentró a explicitarla; sólo la propuso, como una propedéutica de corte realista, y postuló dicho realismo como condición de sentido para su filosofía de la complementariedad. No obstante, para poder juzgar con justicia este objetivo de Bohr, se ha de empezar por exponer el primer paso que le llevó a mantener su postura realista: su tesis semántica.

A lo largo de este apartado, se expondrán las razones y los argumentos, relacionados con dicha tesis, desde los cuales pienso que es innegable que tal fue la intención de Bohr; otra cuestión es si lo consiguió o no, la cual será debatida en los últimos capítulos.

A la hora de decidir entre las dos posturas, que he mencionado al principio, acerca del observacionalismo-fenomenismo y del realismo de Bohr, no se debe perder de vista la importancia que le concedió éste al problema del contenido intuitivo porque en él se defiende que la realidad es aquello que le proporciona un soporte ontológico al lenguaje físico de la teoría, en tanto garantía de su conexión con aquélla y de su validez científica, como así lo atestiguan estas palabras de Bohr:

“... a las distintas posibilidades de la lógica sirven de base ciertas formas fundamentales que no están hechas por el hombre y que, totalmente independientes de nosotros, pertenecen a la realidad. Estas formas juegan un papel decisivo en el proceso de selección que desarrolla el lenguaje, mas no están producidas por este proceso”¹³⁶.

Y, más abajo, insiste aún más en el soporte extralingüístico del lenguaje, necesario para que la teoría mantenga algo de su contenido físico sobre la realidad que estudia, ya que se ha de dar algún tipo de conexión

¹³⁵ Acerca de los argumentos que justifican su compromiso ontológico hablaré en el próximo capítulo y en el sexto me detendré en el modelo de inteligibilidad más adecuado para la complementariedad.

¹³⁶ Cita de Bohr recogida por Heisenberg en HEISENBERG, W., *Discusiones sobre el lenguaje* (1933); en: Diálogos sobre Física Atómica, pp. 173.

entre los elementos teóricos y los que pertenecen a la realidad como elementos objetivos; si no, la física cuántica no puede conservar la capacidad descriptiva sobre la realidad, que poseyeron otras teorías físicas, a pesar de sus peculiaridades:

“Esta propuesta mía envolvía claramente una sobrestimación del lenguaje, ya que éste necesita vincularse a la realidad. (...) El lenguaje se utiliza para completar esta parte real de una imagen con el mayor optimismo y poder de convencimiento posible. Mas, si no se parte de una realidad, determinada, nadie puede provocar por sugestión algo digno de crédito”¹³⁷.

Una vez que Bohr ha admitido la imprescindibilidad de las nociones clásicas, tesis que ya ha sido analizada, ha de especificar el tipo de relación que estos conceptos mantienen con los objetos. Si bien aquellas nociones son ineludibles e imprescindibles por ser las únicas que poseen un significado extralingüístico, su uso está limitado por las relaciones de Heisenberg y, por lo tanto, aquel significado extralingüístico ha de ser revisado y modificado, dando lugar a otro tipo de uso diferente del que venía siendo utilizado en el marco clásico.

He aquí la suma importancia que tiene su tesis semántica, pues conlleva un compromiso ontológico, que es aquello que garantiza el significado extralingüístico y el contenido intuitivo de los conceptos físicos empleados en la teoría cuántica, aunque con las limitaciones del principio de Heisenberg, las cuales conllevan defender una revisión de la gnoseología: una teoría del conocimiento que contemple que tales conceptos físicos sólo pueden tener un significado extralingüístico de un modo analógico y simbólico con respecto a la realidad física que están representando.

En tanto que Bohr alcanza el propósito de conservar algo del contenido físico de los conceptos clásicos sin su característica pictórica, puede verse que si bien la inseparabilidad objeto-aparato de medida, impuesta por el postulado cuántico, es lo que le sitúa en una postura fenomenista, desde la que se disuelve parte del problema de la dualidad al considerar propiedades fenoménicas a las características corpusculares y ondulatorias¹³⁸, también es esta inseparabilidad la que hace referencia no

¹³⁷ También en HEISENBERG, W., *Discusiones sobre el lenguaje (1933)*; en: Diálogos sobre Física Atómica, pp. 174.

¹³⁸ Bohr sostiene que las aparentes paradojas de la dualidad onda-corpúsculo desaparecen cuando se incluyen en la descripción las condiciones experimentales bajo las cuales aparecen

sólo al sujeto, sino también al objeto, en donde radica la otra parte de la solución.

De la combinación de su teoría fenoménica sobre las propiedades y de la apelación a la existencia de los objetos atómicos, a los que se refieren estas propiedades, pero que no son propiamente suyas, sino del fenómeno y, por tanto, no les representan pictóricamente, Bohr parte para proponer el uso analógico de las nociones clásicas. Aunque es cierto que los objetos ya no están pictóricamente representados por los conceptos “sustancialistas”, sí que conservan un uso analógico¹³⁹ con respecto al clásico, en su tipo de referencia que hacen del objeto. El uso simbólico de los conceptos clásicos es lo que les da un significado inambiguo dentro de la física cuántica. Así pues, el puente entre el lenguaje ordinario y el formalismo matemático es este uso simbólico¹⁴⁰. Y todo ello lo realiza Bohr para satisfacer la necesidad de dar un modelo espacio-temporal de los fenómenos cuánticos sin tener que recurrir a su representación pictórica de imagen visual.

Con esto se consigue salvar en parte los conceptos clásicos y la posibilidad de la interpretación física de dichos modelos, y no tener que conformarse únicamente con su descripción matemática. Lo que se pierde es el contenido de la interpretación física al modo clásico: el determinismo, la representación pictórica de los conceptos, la objetividad vinculada a una realidad independiente y, en definitiva, todas las características del marco clásico que han ido apareciendo en esta exposición.

“Este concepto de complementariedad estaba por completo de acuerdo con la postura filosófica fundamental que él sostuvo siempre, y en la que se considera la dificultad de nuestros medios de expresión como un problema filosófico de la mayor trascendencia (...), las dificultades del lenguaje, de la insuficiencia de todos nuestros medios de expresión, de la necesidad que el hombre de ciencia tiene de contar con tales deficiencias también en el futuro, y aclaró que resultaba muy tranquilizador el que tal insuficiencia abarcara también a las formas

los fenómenos complementarios. Cf. BOHR, N., “Discusión con Einstein sobre problemas epistemológicos de la física atómica” (1949), en: Física atómica y conocimiento humano, p. 50; y también, “Introducción” (1929), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, p. 65.

¹³⁹ Este uso se obtiene a partir del principio de correspondencia, tal y como fue expuesto en el anterior capítulo.

¹⁴⁰ Cf. HONNER, H., The description of the nature, p. 157.

matemáticas transparentes que expresan los fundamentos de la teoría atómica”¹⁴¹.

Así pues, renunciar a la teoría clásica desde la complementariedad no significa renunciar a los conceptos “clásicos”, sino al *uso* que esta teoría hace de ellos, al *significado* que desde él se les atribuye y a la *epistemología* a la que dan lugar¹⁴².

También se puede enfocar este mismo punto de otro modo: en filosofía del lenguaje se maneja una distinción lógica entre la intensión y la extensión de las palabras, de aquí que se pueda entender el término “uso” como la intensión del concepto, y “significado” como su extensión. Desde esta perspectiva la extensión que les atribuía la física clásica era la de hacer *referencia* a los objetos “reales”, entendiendo por ellos los objetos tal y como existen independientemente de la observación. En cambio, la extensión que la física cuántica les atribuye es *fenomenista*, en el sentido de que los conceptos se refieren a fenómenos, en los que se incluye el proceso de observación, y no a objetos en sí. Este cambio en el significado de los conceptos clásicos afecta a la intensión o al uso de los mismos, pues ésta es el conjunto de las condiciones que determinan si algo pertenece o no a la extensión del concepto¹⁴³, es decir, es la que establece los límites en la aplicabilidad de los conceptos, cuándo estos pueden ser aplicados a un objeto y cuándo no.

Las condiciones de la intensión que maneja la física clásica de estos conceptos las constituyen sus propios postulados básicos, que expuse en el primer capítulo. Se recordará que una de ellas era la del representacionismo pictórico de los objetos reales por parte de los conceptos, en tanto que ésta no forma parte de la intensión que la física cuántica les atribuye, la epistemología establecerá nuevas condiciones para

¹⁴¹ HEISENBERG, W., “Recordando a Niels Bohr. Años 1922-1927” en: Más allá de la Física, pp. 60-61.

¹⁴² Cf. BOHR, N., “Física y culturas humanas” (1938), en: Física atómica y conocimiento humano, p. 32.

¹⁴³ En contra de lo piensa Agazzi, su propuesta no es diferente de la de Bohr, al menos en lo que se refiere directamente a esta cuestión, pues la afirmación acerca de que los conceptos clásicos han de tener una “nueva combinación semántica” no parece esencialmente distinta a la de Bohr acerca de que las relaciones lógicas entre los conceptos han cambiado en el nuevo marco conceptual, con lo cual su referencia, o “denotado”, ya no es la misma que la referencia clásica. Y es que, aunque se utilicen los mismos conceptos, su uso ha cambiado para hacerse “apropiado” a la hora de designar a los fenómenos cuánticos. Cf. AGAZZI, E., Temas y problemas de filosofía de la física, cap. VIII, pp. 338-341.

la descripción objetiva que la apartarán del requisito clásico de representar objetos “reales” y, por tanto, ha de buscar algún otro que sí esté en concordancia con el nuevo uso y significado que se les ha atribuido en el ámbito de los fenómenos microfísicos¹⁴⁴.

Al cambiar la extensión de los conceptos dándole un carácter fenoménico, las teorías buscarán los requisitos para su objetividad en la descripción fenoménica, en un lenguaje inambiguo basado en la intersubjetividad y no en el carácter ontológico de la representación de objetos reales. Ésta es la razón de que a Bohr le interese más hablar de epistemología que de ontología¹⁴⁵, pues en este punto el requisito de la *descripción objetiva* se aparta y se independiza de la noción ontológica de *realidad independiente*.

De aquí que se imponga la misma conclusión anterior: renunciar a una teoría por otra no es renunciar a los conceptos en sí mismos, pues éstos no son propios de ninguna teoría, sino del fenómeno que permanece invariable en cuanto a su valor fenoménico. Lo que cambia es nuestra comprensión de él, que se manifiesta en el uso y el significado que atribuimos a los conceptos dentro de una teoría u otra. Por tanto, que no podamos “inventar” nuevos conceptos es indicio de que las teorías físicas no son meros instrumentos arbitrarios creados por el hombre¹⁴⁶, aunque la complementariedad sostenga, en oposición al marco clásico, que en la predicción sólo necesitamos este valor instrumental de las construcciones teóricas.

Por esta razón, cuando Folse comienza su crítica a la interpretación instrumentalista de la complementariedad, analiza el significado de la definición teórica de *estado de un sistema aislado*, y establece la diferencia entre las dos funciones que le asigna el marco clásico de la siguiente forma: por un lado, la teoría clásica deriva de esta definición la representación de un

¹⁴⁴ Ya no se planteará el problema de cómo los conceptos pueden representar el mundo de los objetos, se pierde la necesidad de postular un isomorfismo estructural entre el mundo y el lenguaje, pues lo que hacen estos conceptos es describir fenómenos, en los que ya se ha dado un “acoplamiento” entre el objeto y el sujeto que lo observa. Lo cual es cierto que no resuelve el problema de la gnoseología acerca de cómo es posible el conocimiento del mundo, pero sí obliga a plantearlo en otros términos distintos a los de la dualidad cartesiana mente-cuerpo.

¹⁴⁵ O si se prefiere utilizar estos otros términos: le interesa más la gnoseología, la teoría del conocimiento, que la metafísica, a diferencia de Einstein.

¹⁴⁶ Alguna relación con el mundo-objeto han de tener, pero nunca más la de representarlo tal cual es.

objeto real concreto, “picture”, y, por otro, su valor instrumental, al permitir predecir los resultados de las interacciones observacionales futuras.

El marco complementario rechaza la primera función como innecesaria y causante de las paradojas que surgen en el nivel cuántico. Pues, de aquella primera función se deriva la demanda clásica de que el estado de un sistema aislado nos ofrece un conocimiento objetivo del mundo más allá del fenómeno, ya que aquella nos capacita para dar una imagen de éste al reflejar la posibilidad clásica de visualizar sistemas físicos sin necesidad de que interaccionen con el observador.

Así, a la hora de comprender cómo la complementariedad es capaz de ofrecer una descripción objetiva sin apelar a una realidad independiente hay que establecer una clara separación entre estas dos nociones que la física clásica mantuvo tan estrechamente relacionadas¹⁴⁷.

En el próximo capítulo me detendré en el segundo elemento que he considerado determinante para considerar realista la aportación de Bohr a la interpretación del formalismo cuántico y que está estrechamente relacionado, como se ha podido comprobar hasta ahora, con esta tesis semántica: su compromiso ontológico.

4.4) Interludio Filosófico

Es conveniente no pasar al capítulo quinto, sin hacer un paréntesis para situar filosóficamente la propuesta de Bohr. Pero, en este apartado final también daré algunos apuntes, a modo de esbozo, acerca de la oposición que mantuvo Einstein en este mismo contexto filosófico, la cual expondré con gran detenimiento en el próximo capítulo. Por último, antes de terminar esta fase, compuesta de los cuatro primeros capítulos, la cual ha sido más bien analítica y expositiva, y sin muchas aportaciones nuevas al marco de la complementariedad, se impone una recapitulación de todo lo dicho hasta el momento para no perder de vista los puntos fundamentales, que me han guiado en este estudio, desde el principio hasta la tesis final del último capítulo.

a) La empresa de Bohr frente a la empresa kantiana: su interpretación del formalismo como una empresa no-transcendental

¹⁴⁷ Cf. FOLSE, H., The Philosophy of Niels Bohr, p. 230-231.

Es más que una coincidencia que sea Kant el filósofo con el que, más a menudo, se le asocie a Bohr y se realicen estudios comparativos de ambos. Unos defienden las diferencias e incompatibilidad de los dos autores y otros sus semejanzas e, incluso, la inclusión de la interpretación de Bohr en el sistema filosófico kantiano. No obstante, pueden encontrarse tantas diferencias como similitudes, dependiendo de la lectura que se realice de ambos; pero hay dos aspectos que los distancian, los cuales son, a mi parecer, indiscutibles: por un lado, que el objetivo y la tarea epistemológica de Bohr no es una empresa trascendental en sentido kantiano y, por otro lado, que el papel que Kant otorga al sujeto no es el mismo que el defendido por Bohr. Kant introduce en la teoría del conocimiento a un sujeto gnoseológico; mientras que el sujeto de Bohr es siempre empírico, como aquel que construye y diseña los aparatos de observación y medida, que son, en última instancia, aquéllos que no pueden ser separados del objeto, sometido a experimentación¹⁴⁸.

La tarea epistemológica de Bohr, acerca de las condiciones para la comunicación inambigua, no es propiamente una empresa trascendental, en el sentido de que no es una búsqueda de los límites de nuestro conocimiento, porque estos límites ya se conocen: son los límites que la aparición del postulado cuántico ha impuesto a nuestro conocimiento de la Naturaleza, y que fueron cuantitativamente expresados en las relaciones de Heisenberg. De lo que se trata más bien es de sacar a la luz las condiciones que estos límites, teóricos y experimentales, imponen a la objetividad de la comunicación inambigua y completa de nuestras experiencias en física cuántica. Limitación que se nos presenta a través del lenguaje, es decir, de nuestros conceptos descriptivos¹⁴⁹.

La tarea de Bohr y la de Kant son parecidas, ambos “*consideraron las condiciones necesarias que se aplican a la posibilidad del uso de nuestros conceptos descriptivos acerca del mundo*”¹⁵⁰, ambos dan al sujeto

¹⁴⁸ Volveré a hablar de Kant y Bohr en el último capítulo, donde expondré algunas posibles coincidencias, que son las más polémicas y debatibles.

¹⁴⁹ Es la experiencia la que nos exige cambiar nuestros conceptos y nos ofrece el nuevo modo como debemos usarlos, y en ningún caso se trata de un dictamen de la razón. De aquí que la tesis de Bohr sobre la indispensabilidad de las nociones clásicas no se corresponda con la necesidad y objetividad que Kant atribuye a las intuiciones puras sobre las que se edifica su argumentación. Esta equiparación de ambos argumentos es sólo formal; con ello no quiero decir que las intuiciones puras sean, o se correspondan con las nociones clásicas, pues esto no sería cierto. Cf. FOLSE, H., “Kantian Aspects of Complementarity”, pp. 62-64; y también del mismo autor: *The philosophy of Niels Bohr*, p. 218.

¹⁵⁰ HONNER, J., *The description of nature*, p. 106.

un lugar importante en el conocimiento del objeto, perdiendo la posibilidad de describir la realidad independientemente del sujeto, pero reconquistando la objetividad de ese conocimiento.

Sin embargo difieren en su objetivo esencial: Kant busca los límites del conocimiento y el restablecimiento de la objetividad partiendo de las condiciones necesarias y universales que nos imponen nuestras “formas de intuición”, siguiendo la terminología kantiana. En cambio, Bohr no sólo busca estas condiciones en el lenguaje, y no en los modos de conocer de nuestra razón, sino que además parte de las limitaciones del conocimiento físico, que ya tiene en sus manos porque han sido aportadas por la propia teoría física, para llegar a dichas condiciones, las cuales son «necesarias para la comunicación inambigua dentro del marco actual de la complementariedad», pero no universales ni necesarias en un sentido absoluto, dado que siempre son revisables, ya que ellas se han derivado del hecho de haberse ampliado nuestro área de experiencia¹⁵¹.

“La ciencia tiene por misión extender y ordenar el ámbito de nuestro conocimiento experimental, y esta tarea presenta aspectos variables, íntimamente conectados los unos a los otros. Sólo por la experiencia misma llegamos a reconocer aquellas leyes que nos garantizan una visión comprensiva de la diversidad de los fenómenos y justo por ello debemos estar siempre preparados para modificar las ideas directrices que ordenan nuestra experiencia a medida que nuestro conocimiento se amplía. A este respecto debemos recordar, ante todo, que las nuevas experiencias surgen en el marco de nuestros puntos de vista y formas de intuición habituales”¹⁵².

En tanto que este área es susceptible de ampliación en el futuro como lo ha sido en el pasado, las condiciones podrán y deberán ser cambiadas por las otras nuevas que establezcan los nuevos fenómenos. Lo único necesario y universal aquí es que siempre se darán unas condiciones específicas para la comunicación, derivadas del tipo de relaciones que los conceptos guardan entre sí en un marco conceptual cada vez más amplio¹⁵³.

De acuerdo con esto, la enseñanza de la lección epistemológica, acerca de que todos los marcos conceptuales son revisables, no admite la

¹⁵¹ Ésta es la “verdad profunda” y la enseñanza general con la que se encontró Bohr.

¹⁵² BOHR, N., “Introducción” (1929), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, p. 52.

¹⁵³ Cf. BOHR, N., “Causality and Complementarity” (1937), p. 289.

objeción de que campos más amplios de la experiencia, aún por llegar, podrían revelar circunstancias y datos que nos son ahora desconocidos y que demostrarían la incompletud de la física cuántica, y con ella toda la epistemología del marco conceptual, por haber sido derivada de las peculiares características de la teoría cuántica considerada completa. Tal objeción carece de fundamento porque, del mismo modo que el marco complementario es una ampliación del anterior, el hipotético futuro marco también sería una ampliación del que propone Bohr. Con lo cual la completud de la física cuántica no se pondría en duda, sólo su inadecuación al nuevo ámbito de fenómenos y la lección epistemológica quedaría intacta.

Esto no lo dice explícitamente Bohr, pero lo he deducido de dos factores, que sí están presentes en sus escritos: en primer lugar, de su afirmación acerca de los marcos conceptuales, que son todos revisables y ampliables, y en segundo lugar, de su convencimiento de que la física cuántica es una teoría completa.

No obstante, volviendo al carácter de esta empresa epistemológica, Honner dice: “*Aprendemos palabras al aprender a usarlas en un contexto. Pero no deseo embarcarme en una discusión quineana acerca de si las palabras trazan su significado desde el mundo o viceversa, o si simplemente desde su coherencia en un lenguaje*”.¹⁵⁴ Sin embargo, es de este punto desde el que hay que partir en las reflexiones que se hagan acerca de la propuesta de Bohr sobre los marcos conceptuales, ya que este enfoque del problema del lenguaje es más fiel a la postura que mantuvo Bohr acerca de la tarea epistemológica que se ha impuesto que aquella que mantiene Honner acerca del carácter transcendental de la filosofía de Bohr¹⁵⁵. En este sentido, mantengo que la tarea epistemológica tiene más relación con las teorías de la filosofía del lenguaje que con la filosofía transcendental de Kant¹⁵⁶, pues la pregunta de Bohr no es *¿qué podemos conocer? ¿cuáles son los límites de este conocimiento?*

Esta tarea acerca de los límites del conocimiento físico la realizó la física y no la epistemología, dando la respuesta tanto por la vía de la

¹⁵⁴ HONNER, J., *The description of nature*, p. 86.

¹⁵⁵ Cf. *Ibid*, cap. 3.

¹⁵⁶ Al fin y al cabo, la propuesta de Kant hunde sus raíces en la ontología, sobre todo a través de su noción de noúmeno; en cambio, esta corriente logicista de la primera mitad del siglo XX, al no poder resolver las cuestiones ontológicas más que postulando débilmente un isomorfismo estructural entre lenguaje y realidad y un “mapeado” del mundo por medio de las palabras, centra su interés y su fuerza en las condiciones lógicas para un lenguaje claro, correcto y depurado de obscuridades y ambigüedades.

evidencia experimental como por la de la teoría. La empresa epistemológica partirá de ellos, basándose en el tipo de información que nos ofrece la física cuántica¹⁵⁷, para establecer cuáles son las nuevas relaciones que el lenguaje ordinario ha de mantener entre sus términos, con el fin de poder ser aplicados inequívocamente a los objetos cuánticos, cuyas propiedades son las que nos están obligando a cambiar el marco conceptual por no coincidir con la intensión que este lenguaje atribuye a sus conceptos en el ámbito clásico. Por esta razón Bohr, refiriéndose al descubrimiento del cuanto de acción, afirma lo siguiente:

“Este descubrimiento no sólo constituye la base para ordenar en un grado siempre creciente nuestra experiencia relativa a los fenómenos atómicos (...) sino que, al mismo tiempo, ha provocado una completa revisión de los fundamentos que subyacen a nuestra descripción de los fenómenos naturales”¹⁵⁸.

La pregunta queda así configurada: *¿qué requisitos ha de cumplir el lenguaje natural de la descripción física, en el que se expresa esta información sobre la Naturaleza, para ser objetiva y completa, sin perder algún tipo de referencia empírica por parte de los términos descriptivos, los cuales se utilizan para obtener y comunicar esta información?*

Una pregunta muy parecida a la de las teorías referencialistas del significado: *¿cuáles son las características de la intensión de un término que establecen si éste puede ser aplicado o no a un objeto?, es decir, ¿cuáles son los requisitos para que el término no tenga únicamente intensión, sino también extensión o referencia?, o también, ¿cuáles son las condiciones del lenguaje para que un término pueda ser utilizado refiriéndose a un determinado objeto?*

Pero esta búsqueda no se realiza en función de una representación del objeto tal cual, sino en función de sus propiedades. En este sentido las

¹⁵⁷ Por esto dice Bohr: “Las formas simbólicas de expresión de las matemáticas no son aquí sólo un instrumento indispensable para describir relaciones cuantitativas, sino también nuestro principal medio de análisis de concepciones cualitativas generales”. Y un poco más adelante: “En el artículo se insiste en que el ropaje simbólico de los nuevos métodos se corresponde punto por punto con el carácter en esencia no intuitivo de los problemas a los cuales se aplica”. BOHR, N., “Introducción” (1929), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, pp. 58 y 61; y también, “Unidad del conocimiento” (1954), en: Física atómica y conocimiento humano, p. 84.

¹⁵⁸ BOHR, N., “El cuanto de acción y la descripción de la naturaleza” (1929), en: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, p. 133.

condiciones del lenguaje físico son las propiedades que la teoría física nos ha revelado acerca de los objetos atómicos.

Así pues, dado que la característica esencial de estas propiedades es que son fenoménicas y que, por tanto, no se refieren sólo al objeto, sino también al sujeto, la referencia de estos términos no es el objeto representado pictóricamente por el concepto, sino que el objeto de la referencia es un *símbolo* desde el que no se puede separar la realidad de nuestra actuación sobre ella, pero que conserva su función de ser una referencia empírica en la medida en que no es una construcción puramente subjetiva.

b) Objeciones del “realismo clásico” a la complementariedad: apuntes sobre Einstein

El punto de partida de Einstein es el opuesto al de Bohr: aquél cree que una teoría ha de describir la realidad en sí misma, independiente, y que, de esta forma, hable de “hechos”, de lo fáctico, y no tan sólo de probabilidades. Para Einstein la doctrina de Bohr del actor-espectador nos aleja del programa realista, ya que su criterio ontológico se basa en la creencia en la existencia de un mundo objetivo, donde se producen los procesos físicos en un marco espacio-temporal, “independiente de nosotros, según leyes fijas”¹⁵⁹.

Einstein está convencido de que este programa es realizable en el mundo microfísico si se renuncia al atomismo clásico (a la localización completa de las partículas), en favor de una teoría del continuo, donde las características atómicas se expresan a través de leyes integrales (sin determinar la localización), que obedecen a ecuaciones de campo: las funciones continuas del espacio sustituyen al punto material (al corpúsculo)¹⁶⁰. Se ha de explicar la estructura atómica de la materia y de la energía por funciones continuas (campos).

En su alternativa a la física cuántica, apelará a la simplicidad teórica: los conceptos matemáticos más sencillos, el limitado número de campos y de ecuaciones simples. Esta simplicidad es la clave para alcanzar

¹⁵⁹ HEISENBERG, W., *Penetrando en tierra nueva*. En: *Diálogos sobre física atómica*, p. 102.

¹⁶⁰ Cf. EINSTEIN, A., *Sobre el método de la física teórica*. En: *Mis ideas y opiniones*, p. 247.

y captar la realidad, pues nos indica el “camino correcto”, tras haber introducido la creatividad en la ciencia.

El principio creativo reside en la matemática (y, por tanto, en la razón, el pensamiento puro), aunque la experiencia es el criterio último de utilidad física de una construcción matemática¹⁶¹. La verdad está en la simplicidad, siempre y cuando se adecue a la experiencia; la contrastación experimental es un paso básico y necesario, pero no suficiente para alcanzar la verdad; esto es, para captar y representar la realidad. Éste es el racionalismo de Einstein que, básicamente, le diferencia de Bohr.

Pero, además, Einstein no admite la revisión, propuesta por Bohr, de los marcos conceptuales. Recuérdese que, para Bohr, las relaciones entre los conceptos dentro de un determinado marco teórico nos vienen dadas por la experiencia: cuando ésta se amplía, el marco conceptual cambia y se ensancha para dar cabida a los nuevos fenómenos; el postulado cuántico y la discontinuidad se introdujeron de esta forma en el nuevo marco, es decir, a través de la experiencia.

En cambio, para Einstein estas relaciones las establece la razón, por tanto, él defiende la noción de campo y la continuidad, ya que son los conceptos más simples¹⁶²; de esta forma niega que el postulado cuántico sea una característica esencial de la naturaleza, ya que lo que nos acerca a la verdad, lo real es la simplicidad y el modelo de continuidad es el más simple. Otra característica más del racionalismo de Einstein, que más le distancia del pensamiento de Bohr y ello a pesar de que el punto de partida de ambos, en cuanto a la formación de los conceptos, sea empirista.

Según Einstein, las relaciones entre los conceptos son de naturaleza lógica, pero los conceptos en sí mismos son “supuestos libres” desde el punto de vista lógico, pues su contenido sólo se establece a través de su relación con nuestras experiencias sensitivas: “*Los conceptos y proposiciones sólo cobran «sentido» o «contenido» a través de su relación con experiencias de los sentidos. El nexo entre éstas y aquéllos es puramente intuitivo, no es en sí de naturaleza lógica*”¹⁶³. Este vínculo no es de naturaleza lógica sino *intuitiva*.

¹⁶¹ Cf. EINSTEIN, A., *Sobre el método de la física teórica*. En: *Mis ideas y opiniones*, p. 246.

¹⁶² Son los más simples, para Einstein, porque con ellos se explica la electrodinámica y la gravedad, además de la aspiración de éste a explicar la materia y la energía desde una nueva teoría del campo único.

¹⁶³ EINSTEIN, A., *Notas Autobiográficas*, p. 17. Y en otra parte declara: “... es indispensable una vasta colección de hechos para establecer una teoría que tenga

He aquí la razón de que el pensamiento (científico) tenga un carácter constructivo y especulativo, puesto que Einstein emplea aquí este término sólo en el sentido de *creación arbitraria* o “supuesto libre”, en contra del *prejuicio positivista*, que “consiste en creer que los hechos por sí solos, sin libre construcción conceptual, pueden y deben proporcionar conocimiento científico”.

Todas estas anotaciones sobre la alternativa epistemológica de Einstein serán el tema del próximo capítulo, pero no quería cerrar éste sin apuntarlas brevemente, para no perder el contexto en el que fueron defendidas por Einstein. A continuación, ofrezco una recapitulación de los puntos de partida que he adoptado hasta ahora.

c) Recapitulaciones sobre el marco cuántico: teoría e interpretación

Hay una *tesis inicial*, propuesta por el propio Heisenberg, de la que también he partido yo y es la siguiente: *existe un ideal de descripción física, el cual consiste en que las teorías físicas poseen un cierto contenido intuitivo, que las pone en correspondencia con el mundo objetivo (exterior) que están describiendo.*

Ahora bien, este punto de partida nos compromete con dos preguntas fundamentales: *cuál es la naturaleza y cuáles son las características de tal “contenido intuitivo”*. Por un lado, se ha de explicitar en qué consiste este contenido intuitivo en la medida en que es capaz de describir la realidad, de entrar en contacto con ella. Por otro lado, se han de establecer sus características o propiedades: su vinculación con el

probabilidades de éxito. Pero este material no proporciona por sí mismo un punto de partida para una teoría deductiva; bajo el efecto de este material se puede, sin embargo, llegar a encontrar un principio general que podrá ser el punto de partida de una teoría lógica (deductiva). Pero no hay ningún camino *lógico* que conduzca desde el material empírico hasta el principio general sobre el cual reposará después la deducción lógica.

No creo pues que exista un camino del conocimiento de Mill basado sobre la inducción, en todo caso no un camino que pueda servir de método lógico. Por ejemplo, creo que no existe ninguna experiencia de la que se pueda deducir el concepto de número. Cuanto más progresa la teoría, tanto más claro se hace que no se pueden encontrar por inducción las leyes fundamentales a partir de los hechos de la experiencia (por ejemplo, las ecuaciones del campo de la ecuación de la gravitación o de la ecuación de Schrödinger de la mecánica cuántica). De una manera general, se puede decir: el camino que conduce de lo particular a lo general es un camino intuitivo, el que conduce de lo general a lo particular es un camino lógico”. EINSTEIN, A./BESSO, M., Correspondencia con Michele Besso, carta 183 de Einstein, fechada el 20 de marzo de 1952, p. 406.

lenguaje natural y el modo cómo describe esa realidad, ofreciendo una determinada *representación del mundo*.

En otras palabras, se ha de indagar en su *capacidad para describir el mundo objetivo*, para conectar con la exterioridad, objetividad de la ciencia (esto es, el significado extralingüístico de los términos conceptuales del lenguaje físico); además del modo cómo éste nos permite entender el mundo y hacernos una representación de él: estoy hablando de un modelo de inteligibilidad.

A continuación, presentaré los *ocho puntos fundamentales* en los que se puede desglosar y resumir el contenido de todo lo dicho hasta este momento.

1) *El ideal descriptivo de la ciencia moderna y su modelo de inteligibilidad*. Copérnico introdujo el *realismo racionalista*, para predecir y explicar los fenómenos, cuyo *modelo de inteligibilidad* implicaba la idea pitagórico-platónica de la *armonía matemática del universo*¹⁶⁴.

La *finalidad* que perseguía este modelo de inteligibilidad realista de la ciencia moderna, como ideal de descripción física, que incluya la predicción y la explicación, no ha cambiado básicamente en física cuántica; pero sí ha sufrido “cambios circunstanciales”, que llevaron a Bohr a proponer *otro modelo de inteligibilidad* distinto al de la física clásica, es decir, otra forma de alcanzar el objetivo del ideal de descripción realista, pero, respetando el espíritu, que no la letra, de este ideal descriptivo de la ciencia moderna: ya no se trataría de un realismo racionalista, como el de Einstein, sino de otro tipo de realismo, aún por definir. Al fin y al cabo, las matemáticas con las que ahora se describe el mundo han cambiado y lo han hecho de tal modo que los cambios introducidos afectan esencialmente a aquel otro gran ideal, que se mantuvo anexionado al anterior, acerca del tipo de descripción que el “materialismo mecanicista” impuso en la ciencia: el mundo entendido como un gran mecanismo de relojería, el “Universo-

¹⁶⁴ Recordaré lo que expuse en el primer capítulo: “Según esta doctrina, el mundo es inteligible porque tiene una estructura racional, ordenada y armónica, que puede entenderse y describirse desde la matemática, el número y la geometría: la *razón matemática* es proporción y para comprender el mundo hay que abordarlo desde su armonía, regularidad, sencillez y uniformidad, donde todas las cosas tienen sus proporciones matemáticas. Esta idea se oponía a la postura de Aristóteles, que sólo le da al número una importancia intermedia. En cambio, para los platónicos y pitagóricos, la esencia del mundo era matemática y el número era la base de toda ella, incluso de la geometría, desde la cual se podía conocer la estructura de la realidad: *el espacio de la geometría era el espacio real del universo real*. La identidad entre astronomía y geometría era una importante doctrina metafísica: aquello que se afirmaba y era verdadero de una, lo era también, necesariamente, de la otra”, p.14.

máquina”, cuyo determinismo físico en términos espacio-temporales (cinemáticos) permitía obtener de él una representación isomórfica respecto a estos términos; es decir, una descripción espacio-temporal bien definida y acorde con el espacio y el tiempo de nuestra percepción, con la cual se consigue tener “imágenes descriptivas ordinarias”, “modelos visuales” (espacio-temporales) de aquel mundo mecánico.

2) *El representacionismo pictórico como ideal de descripción física y modelo de inteligibilidad del marco clásico.* El modelo de inteligibilidad del representacionismo pictórico, que defendió la física clásica, se ha de entender sin las connotaciones coloristas de una pintura y como una relación de isomorfismo estructural entre el concepto y el objeto, pues exige que el contenido físico de los elementos teóricos se establezca a través de una “correspondencia directa (u ostensiva)” entre lenguaje y realidad; más, concretamente, una correspondencia directa de las **relaciones espaciales** que se dan en la realidad y que se manifiestan en el lenguaje. Dicho de otra forma, una “representación pictórica”, un “modelo visual” o una “imagen física” es una descripción espacio-temporal ordinaria, bien definida y objetiva del mundo, cuyas características espacio-temporales, como elementos básicos de nuestra teoría, se corresponden estructuralmente, o formalmente, con las propiedades espacio-temporales objetivas que conforman la realidad del mundo físico, su estructura.

Tal correspondencia directa del representacionismo o del lenguaje pictórico implica que la vía principal por la que se alcanza tal conexión es la de la intuición espacial, pues es la que ofrece modelos ostensivos-pictóricos de la realidad (donde ésta se nos *manifiesta* tal cual es); es decir, aquéllos que son capaces de ofrecer una descripción espacio-temporal bien definida y objetiva.

A partir del siglo XVII aquel ideal general de descripción se concretó en el programa mecanicista que Descartes propone desde la geometría analítica, donde se alcanza una descripción de la realidad a través de figuras y movimientos. Tal programa de matematización de la realidad consistía en explicar las cualidades secundarias en función de las primarias, consideradas como la *extensión* (espacio) y el *número* (tiempo). No obstante, para el atomismo mecanicista la característica fundamental de la naturaleza es la extensión (su espacialidad) porque sólo a través de una geometrización de la materia puede darse una descripción espacio-temporal bien definida de su posición y de su movimiento, siguiendo las coordenadas cartesianas.

En otras palabras, al identificar la materia con la extensión, de modo que lo inteligible de la materia es que está compuesta de partes

geométricas, se consigue dar una descripción espacio-temporal bien definida de los cuerpos materiales¹⁶⁵.

Con este modelo de geometrización de la realidad se conseguían obtener modelos ostensivos (pictóricos) de la realidad, pues se ha estructurado espacialmente a ésta, de tal modo que su estructura espacial (geométrica) coincide con la estructura teórica de la geometría euclídea y de las coordenadas cartesianas. Por ello, he dicho antes que el modelo de inteligibilidad que se usaba en física clásica recurría a la intuición espacial como vía principal y directa para la conexión ostensiva entre teoría y realidad a través de modelos pictóricos.

Si bien, no todas las teorías de la física clásica se reducen a una descripción geométrica en el espacio euclídeo, todas defendían su realismo, basándose en esto. Es decir, el contenido intuitivo de la física clásica se justifica a partir de las imágenes espacio-temporales en la geometría de Euclides (un espacio plano y continuo, que se corresponde con el espacio de nuestra percepción) y es lo que capacita a una teoría para cumplir el ideal de descripción física; aunque en física cuántica se pierde gran parte del primero, si no todo, Bohr pretende seguir manteniendo dicho ideal descriptivo, para lo cual impondrá un uso analógico de la terminología física, con el fin de esclarecer estas contradicciones conceptuales que no cesaban de aflorar.

3) *Objetividad y realismo clásicos unidos por el representacionismo pictórico.* El postulado del representacionismo pictórico garantizaba una noción de realismo vinculada al ideal de objetividad clásica y, a su vez, aquél estaba avalado por ella: una teoría realista era aquella que ofrecía una descripción objetiva del mundo físico en el sentido de ser independiente del sujeto cognoscente y de las circunstancias en que éste lo estudia. El marco clásico pudo suponer que las propiedades geométricas y dinámicas de los fenómenos son las

¹⁶⁵ De nuevo en el capítulo I escribí: “Pues, tanto el espacio y el tiempo como la materia se habían geometrizado de tal manera que el marco espacial se dividió siguiendo el esquema cartesiano del eje de coordenadas, x , y , z , dentro del cual a todo cuerpo, o a su componente material, le correspondía una posición, y sólo una, exactamente determinada por los tres números de las coordenadas espaciales. En cuanto al tiempo, éste sería meramente la variable t en función de la cual puede medirse el número de “instantes-unidades” que tarda un cuerpo en cambiar de coordenadas, es decir, en desplazarse de un punto a otro del espacio.

Estos cambios en su posición espacio-temporal se realizaban de tal forma que se podía trazar una trayectoria continua entre los puntos posicionales que recorre un móvil en su desplazamiento, pues no existía, como ya se verá más adelante, ningún impedimento teórico a la hora de asignar a los instantes t_1 y t_2 su posición espacial correspondiente”, pp. 19-20.

propiedades reales, que los objetos poseen en sí mismos, así podía describir la realidad independiente del sujeto que la conocía, a través de unas propiedades objetivas que sólo le correspondían al objeto. Por este motivo, ambas nociones, objetividad y realismo, aparecían estrechamente unidas. Dicho vínculo estaba justificado por el realismo racionalista de la ciencia moderna, el cual, siguiendo el postulado clásico del “representacionismo pictórico” y de las propiedades objetivas, estableció este tipo de conexión entre los objetos del mundo físico y nuestros conceptos descriptivos.

Dicho en pocas palabras, la física clásica evadía los problemas subjetivistas y evitaba caer en el idealismo, logrando defender su realismo a través de una noción de objetividad que abarca el determinismo: la descripción causal y visual en un marco espacio-temporal, al margen siempre del observador. Ahora, esa objetividad se revela del todo impracticable en física cuántica y la única forma de defender el realismo es demostrando la conexión de las teorías con la realidad a través del significado de sus conceptos.

4) *El realismo de Bohr desvinculado de la objetividad.* En sus reflexiones, Bohr siempre partió de las consecuencias epistemológicas que introdujo el postulado cuántico, pues considera que la discontinuidad es un hecho básico de la naturaleza, el cual determina las condiciones bajo las cuales podemos hacer ciencia¹⁶⁶.

De este modo, el nuevo sentido de *objetividad*, como una propiedad de las descripciones¹⁶⁷ y no de la “realidad objetiva”, es consecuente con la idea de que los conceptos clásicos descriptivos de onda y partícula se han de entender como atributos de estado de los fenómenos y no como propiedades sustanciales de los objetos en sí mismos porque sólo pueden

¹⁶⁶ Por este motivo, afirmé: “En esta doble revolución, fue la construcción de la nueva física la que creó la necesidad de otro marco conceptual desde el que poder asumir este postulado, guiando el nuevo giro epistemológico que se ha de dar para que el proceso de conceptualización de la física corra parejo a su avance en la investigación de nuevos campos de experiencia y teorización. Con la finalidad última de que la teoría sea explicativa además de operativa, es decir que tenga un contenido físico, desde el que poder “comprender” el comportamiento de la Naturaleza. De forma que la discontinuidad esencial que introduce el postulado cuántico en la Naturaleza será el postulado básico del que ha de partir la nueva conceptualización de la realidad física, sustituyendo a su homólogo en el marco clásico, el postulado de la continuidad. La primera consecuencia que introduce esta discontinuidad es la inseparabilidad sujeto-objeto, de la cual se deriva el problema del fracaso de los modelos visuales, como representaciones pictóricas de la realidad, y la ruptura de la descripción causal y espacio-temporal”, pp. 150.

¹⁶⁷ Ver citas de Bohr, TADN, pp. 146 y 153.

referirse a las propiedades de los objetos fenoménicos y no a aquéllas propias de una realidad física independiente, ya que no puede separarse al objeto de su dispositivo experimental¹⁶⁸.

Dentro de la complementariedad, la objetividad clásica es una idealización, que no puede mantenerse en el nivel atómico. Porque, “*todo conocimiento comienza con la observación*” y sólo puede hacerse física de los “observables”; estos observables se producen cuando interferimos con nuestros instrumentos de medida, una interferencia, cuyo valor (numérico y epistemológico) no es despreciable ni infinitamente reducible debido a que h introduce un límite a la divisibilidad de la interacción observacional. Más allá de los límites del cuanto de acción no se puede ir y esto significa que no es posible conocer la realidad al margen de nuestra actuación sobre ella. Es más, ahora, la física tiene motivos, bien fundados (tanto en la teoría como en los resultados experimentales) para considerar la objetividad clásica como una extrapolación ilícita de las leyes sobre observables en el nivel de los inobservables: “realidad velada” del mundo objetivo, de los llamados “interfenómenos”, “realidad transfenoménica” o “realidad allende”.

Ahora bien, el problema que se plantea aquí es el siguiente: si la física no describe esa realidad allende, cómo salir del subjetivismo, del idealismo o del voluntarismo científico sin el postulado de la objetividad. ¿Cómo saber si la física describe o no la realidad de un mundo exterior? Es decir, ¿cómo saber si las teorías físicas tienen conexión con el mundo real? Las teorías físicas son construcciones, creaciones del intelecto humano; pero ¿son sólo eso? ¿no contienen, además, elementos objetivos? Los físicos afirman que una teoría tiene contenido intuitivo cuando “describe físicamente” la realidad, es decir cuando es algo más que un instrumento matemático de predicción y cálculo. Con esto quieren decir que una teoría es verdadera, o más verdadera que otra, cuando contiene elementos objetivos, o más elementos objetivos que otra. Esto es aquello que determina su conexión con la realidad externa.

¹⁶⁸ Con las siguientes palabras, resumí en su momento esta situación: “Así como no puede concebirse la objetividad como aquello que afecta a algo más allá del fenómeno, sino que sería una propiedad de las descripciones, tampoco es posible concebir la relación entre conceptos y realidad como si aquéllos la representaran -tal cual es-. Esta relación era la que se establecía en el marco clásico, pero si queremos conservar la coherencia, inambigüedad y la objetividad de la física, debemos cambiarla por una relación entre el *concepto* y el *fenómeno*, y nunca considerar la realidad al margen de la observación; de forma que el concepto sólo describa fenómenos porque, en definitiva, es lo único que puede hacer”, p. 152.

Por tanto, ya que el camino hacia el realismo físico a través de la noción clásica de objetividad se ha cerrado definitivamente, ¿queda alguna otra vía que no sea la del contenido físico? Ahora bien, este problema es el más filosófico de los que plantea la nueva física, ya que la respuesta se ha de buscar, en último término, en la teoría del conocimiento ¿Conocemos a través de intuiciones? ¿Son sólo intuitivas las nociones clásicas (basadas en el marco espacio-temporal) y por ello imprescindibles?

La cuestión del contenido intuitivo y la descripción espacio-temporal es el problema más acuciante al que se enfrenta la física cuántica. Pues, hasta ahora Bohr ha estado apartando de su camino el problema del realismo; pero, justo en este punto, no podrá seguir eludiéndolo y tendrá que ofrecer, como mínimo, una “declaración de intenciones” acerca de este problema: *¿cómo los términos descriptivos con un significado analógico pueden representar la realidad?*

Por un lado, cuando se enfrentó al problema del determinismo dijo que la realidad no tenía por qué ser determinista a la fuerza. El hecho de no disponer de una causa física, perfectamente determinada, no atenta contra el realismo ni contra la causalidad, entendida en un sentido más amplio: en física cuántica disponemos de una serie, o conjunto, de causas que *estadísticamente* determinan el comportamiento de los sistemas atómicos, los cuales no obedecen al ideal determinista (la indeterminación de la realidad natural es física y no gnoseológica). La física cuántica puede considerarse una teoría realista aunque sus leyes sean de probabilidad, ya que la naturaleza está *físicamente (realmente)* indeterminada.

Por otro lado, cuando se enfrentó al problema de la objetividad, también lo apartó de la cuestión del realismo. Dijo que si bien en física cuántica no era posible la separación clásica entre el objeto y el aparato de medida, sí era posible defender una noción de objetividad en un sentido más amplio que aquél donde se la vincula a la noción de realidad física independiente y más profundo, ya que este nuevo sentido de objetividad ya estaba presente en el marco clásico sólo que eclipsado por aquella vinculación que la física cuántica nos revela como una idealización (de las condiciones experimentales y de la interacción observacional) que es, actualmente, impracticable. Bohr dice que la objetividad es descripción sin ambigüedad y, por tanto, que es una cuestión de la descripción, una cuestión de lenguaje y no de la realidad: el compromiso ontológico que la noción clásica de objetividad contiene se desvanece en el nuevo marco conceptual de la física cuántica, la complementariedad. La descripción complementaria es objetiva porque, al incluir en su descripción las circunstancias experimentales, ofrece una información inambigua de los

sistemas atómicos. Y puede seguir considerándose realista porque el otro elemento de esta descripción, aparte de los instrumentos, es el objeto microfísico.

No obstante, qué clase de realidad está describiendo: una realidad físicamente indeterminada que no puede separarse claramente de nuestra actuación como observadores participativos de tal realidad que estamos estudiando. La doctrina del actor-espectador supone una concesión al fenomenismo que nos enfrenta directamente con el problema del instrumentalismo y del realismo: si el objeto de estudio de la ciencia es una realidad indeterminada y fenomenista, qué es lo que puede garantizar que la física cuántica sea una teoría completa, que realmente describa la realidad y no sólo un instrumento predictivo.

Pienso que el único camino que le queda a Bohr, para defender el realismo de la física cuántica y, por tanto, su completud, en el sentido que se le da en la “Polémica”, es el del contenido intuitivo de una teoría: los términos descriptivos de la física clásica son los únicos que poseen este contenido y que son capaces de representar la realidad, pues sobre la base de ellos puede decidirse si una teoría contiene elementos objetivos que conectan a ésta con la realidad.

La solución de Bohr consiste en proponer un cambio en el uso que de ellos hacía el marco clásico pues de esta forma no pueden seguir manteniéndose; se han de usar en otro sentido, un sentido analógico que nos acerca a lo que es la realidad “asintóticamente”, pero nunca la representan tal cual es (ostensivamente). Este significado analógico de los términos descriptivos es consecuencia del fracaso de la descripción espacio-temporal, pues el significado físico, intuitivo, de estos términos en física clásica depende de la posibilidad de dar una descripción espacio-temporal bien definida de los objetos.

Por ello, el contenido intuitivo de una teoría o de unos conceptos alude a la intuición espacial y la temporal, como formas de nuestra percepción y como elementos objetivos, la realidad del espacio y del tiempo; esta coincidencia entre las características reales del mundo, su exterioridad en términos espacio-temporales, y nuestras formas de entender y ordenar, es la garantía que se necesita para conectar teoría y experiencia. Esta *coincidencia* es la razón de que los conceptos clásicos sean los únicos con significado físico o con valor intuitivo y por ello son imprescindibles; no obstante, la física cuántica, considerada como descripción completa de la realidad, implica que las características espacio-temporales del mundo no se ajustan a nuestras intuiciones y, por tanto, se rompe el puente del realismo. ¿Puede reconstruirse desde otra concepción de realismo y desde

otro modelo de inteligibilidad? Esto es lo que Bohr intenta hacer proponiendo el uso analógico de los términos clásicos, cuyo fundamento tomó del principio de correspondencia.

Es cierto que los tres problemas (determinismo, objetividad y contenido intuitivo) están relacionados. Pero el objetivo de Bohr fue defender el carácter intuitivo de la física cuántica para salir del fenomenismo y del instrumentalismo, otorgándole un valor realista; eso sí, se tratará de un realismo distinto al de la física clásica, para lo cual pedirá una revisión de esta noción junto con la de “objeto”, porque ha negado la objetividad clásica y el determinismo. He aquí la clave de ese “malabarismo” epistemológico que efectuó en su filosofía de la complementariedad.

5) *El contenido físico de los conceptos clásicos y el principio de correspondencia.* Para Bohr el lenguaje ordinario y los conceptos clásicos son “la base indispensable de toda posible interpretación del formalismo cuántico y es el que aporta el contenido físico de la teoría cuántica a su esquema matemático. Por ello, considera imposible, o impracticable, la idea de renunciar a estos conceptos y crear otros nuevos, porque con ello lo que se pretendería sería cambiar el mundo fenoménico, el mundo tal y como se nos presenta a nuestra percepción, el mundo que podemos observar y describir”. La nueva forma de entender la realidad, que propone Bohr, implica una manera distinta de describir el mundo, otro ideal de descripción física diferente al de la física clásica, y, por tanto, de entenderlo: el objetivo final de comprensión es el mismo, sólo cambia el camino por el que llegamos a ella. Sin embargo, este nuevo modo de entender no se realiza a través de unos conceptos nuevos, inventados o creados específicamente para el ámbito de la física cuántica, han de ser los mismos que empleamos para describir cualquier cosa; no obstante, al cambiar su uso de la forma que realiza Bohr, también se introduce un cambio en el modelo de inteligibilidad: conservamos las mismas piezas del rompecabezas, pero hemos cambiado la forma de relacionarlas entre sí¹⁶⁹.

¹⁶⁹ Volviendo a lo que ya está escrito en este trabajo: “Sin embargo, a pesar de que la renuncia a las imágenes pictóricas hizo que fuera imposible usarlas en el sentido clásico, para obtener modelos que representaran pictóricamente la realidad como algo que existe independientemente de nuestra observación, Bohr se resistió a su total abandono porque sin ellos se pierde la conexión entre las matemáticas de la teoría y su base empírica. Además del hecho de que nuestros dispositivos experimentales se construyen y están definidos en base a la terminología clásica propia de la escala macrocósmica” -por lo cual, se necesitan estos conceptos- “para comunicar la información que se ha obtenido a través de los aparatos de medida”. -Pero no se usarán- “como en el marco anterior, es decir, como representaciones exactas de una realidad independiente, pues esta posibilidad se perdió en el

Esta validez, para Bohr, es imprescindible por la razón de que los únicos conceptos descriptivos son los clásicos: sólo podemos describir la experiencia a través de ellos, porque así es como percibimos el mundo, así es como éste se nos manifiesta, y, por tanto, son insustituibles para dotar de contenido físico o empírico a la teoría cuántica; es decir, para *describir la experiencia* de una forma que *entendamos* y que podamos *comunicar*, que es el objetivo de la física. Pero, el hecho de descubrir que estos conceptos se han vuelto ambiguos, al aplicarlos a los fenómenos atómicos en una ampliación de nuestra experiencia, nos revela que su validez es restringida. Lo cual obliga a cambiar algo y este algo, como no pueden ser los conceptos mismos, han de ser las relaciones de estos conceptos dentro del marco teórico en que se encuentran y el uso que hacemos de ellos, tal y como establece la lección epistemológica.

La versión revisada del principio de correspondencia le sirvió a Bohr como soporte conceptual para su propuesta de mantener los conceptos clásicos dentro de la nueva teoría. Aunque, para ello, se necesita garantizar la validez de su uso, a partir de una “analogía” y no de la “representación pictórica” de la realidad. Éste será el único modo de evitar la ambigüedad conceptual de la física cuántica y conservar algo de significado físico para el formalismo matemático. Dicha analogía se origina en la dependencia asintótica de los conceptos con la realidad, a partir de nuestra experiencia ordinaria.

Por tanto, hemos de conformarnos con las imágenes imprecisas que ofrecen los conceptos clásicos, cuyo contenido físico es simbólico y no idéntico, o al menos isomórfico, a lo que la realidad es. Pero este sacrificio es inevitable, dado que las condiciones cuánticas revelan el uso ilícito de estos conceptos incluso en el marco clásico, ya que, si el cuanto de acción es una característica esencial de la realidad, el significado pictórico de los conceptos clásicos no es real; tales conceptos se muestran ahora como idealizaciones, en el sentido que se le da en el principio de correspondencia, pues son nociones que se definen dentro del modelo de la *continuidad en las variaciones de energía*, el cual se considera, ahora, como una idealización de las condiciones cuánticas, donde el cuanto de

momento en que la discontinuidad de los procesos atómicos causó la inseparabilidad del sujeto y el objeto en la interacción observacional. De aquí partirá su teoría de las propiedades y su concepto de “fenómeno”: las propiedades, que estas imágenes descriptivas conllevan, no son propiedades del objeto en sí mismo con independencia de la observación, sino todo lo contrario, son propiedades fenoménicas (...). Ahora bien, ¿en qué sentido limitamos el uso de los conceptos clásicos? ¿y siguiendo qué criterio? Bohr buscó las respuestas a estas preguntas en el principio de correspondencia”, pp. 159-160.

acción tendría la posibilidad lógica de tender infinitamente a cero. Por ello, se hace necesaria una revisión de los conceptos, partiendo del análisis de los postulados teóricos de cada marco conceptual, dado que éstos son los que fijan las condiciones de aplicabilidad de los conceptos vigentes, con lo cual se garantiza la validez de su significado y del uso que la propia teoría hace de ellos. Cuando consideré esta situación, concluí que la complementariedad constituye el esfuerzo de Bohr para comprender las propiedades fenoménicas de los sistemas atómicos como entidades reales; pero tal objetivo precisa de la existencia de un vínculo conceptual entre el formalismo matemático y la descripción física de los sistemas y de los procesos microfísicos, con el fin de conservar el ideal descriptivo y explicativo de la ciencia moderna. Ahora bien, dicha necesidad sólo puede ser satisfecha si la teoría contiene un lenguaje intuitivo, al que poder traducir el lenguaje matemático de este formalismo no-clásico, y, así, obtener el tipo de descripción mecánica que permite el mundo atómico y que mantiene algo de la descripción espacio-temporal: un tipo de descripción que ha de ser compatible con la discontinuidad cuántica. El resultado de esto es el uso analógico y el significado simbólico de los conceptos clásicos espacio-temporales, los cuales, ahora, sólo nos ofrecen imágenes imprecisas, modelos espacio-temporales asintóticos, no isomórficos, de la realidad.

6) *El contenido físico de la complementariedad onda-corpúsculo.* La solución de la paradójica dualidad onda-corpúsculo, a través de la idea de conservar un uso analógico de las nociones clásicas, le proporciona una forma de salvar algo de la descripción espacio-temporal, desde la que se puede buscar algún tipo de contenido físico para la teoría cuántica.

Por ello afirmé más atrás que la primera formulación de la complementariedad, le sirvió a Bohr para resolver el dilema de la dualidad onda-corpúsculo y disolver su inconsistencia, y, de esta forma conservar alguna validez para las imágenes clásicas: Bohr justificó la ampliación del marco conceptual apoyándose en la dualidad entre lo continuo y lo discontinuo, lo cual le permitió no renunciar del todo a las imágenes construidas sobre la base clásica de la continuidad. Aun más, partió de la complementariedad onda-corpúsculo para proponer el nuevo uso que se ha de dar a los modelos clásicos, el cual permite conservar algo de la aplicabilidad de la descripción espacio-temporal a la representación de los fenómenos, en la que se basan los modelos clásicos, pero, en esta ocasión, sin aludir a nada visual. El motivo de esto es que el danés aplica la idea de “mutuamente excluyentes” también a la continuidad clásica y la discontinuidad cuántica, ya que se dio cuenta de que los modelos clásicos

de onda y partícula «presuponían un comportamiento espacio-temporal continuo, lo cual está, por ejemplo, implícito en el concepto clásico de partícula, la cual tiene una trayectoria espacio-temporal continua», afirma Bohr. También puso de relieve que todas las palabras de nuestro lenguaje, en general, se basan en la continuidad «en el sentido de que la continuidad es un presupuesto de la conceptualización de toda experiencia», afirma con sus propias palabras. Ésta es la razón de que los conceptos tengan un significado inambiguo en el marco clásico, ya que éste también se basa en la continuidad¹⁷⁰.

Al final del sexto capítulo se comprobará si existen o no experimentos decisivos para solucionar este problema; pero, si no los tuviéramos, se tendría que dar la razón a Reichenbach cuando defiende la necesidad de acudir al análisis filosófico de la física, «que depende de la cuestión sobre qué es el conocimiento». De momento, recordaré que el primer intento de resolver esta situación acerca de la dualidad fue el de Heisenberg. Su renuncia a los modelos imaginativos es consecuencia de la interpretación de Bohr del problema de la dualidad onda-corpúsculo: si es imposible dar una descripción espacio-temporal de los procesos atómicos en los intercambios de energía, entonces no es posible obtener un modelo “visual”, ya que, tanto el modelo de onda como el de corpúsculo, ofrecen una imagen del electrón en términos espacio-temporales. Sin embargo, esta

¹⁷⁰ Reproduciré aquí la explicación que ofrecí de esta afirmación de Bohr: “No obstante (...) si bien este uso clásico se vuelve ambiguo cuando la continuidad falla, el hecho de partir de la discontinuidad, como el nuevo supuesto que sustituye al anterior, abre la posibilidad de emplear inequívocamente estos modelos de otra forma, es decir, con un significado y un uso distinto de los que tenían en el marco clásico, convirtiéndose en los modelos no-estándar”(...). “La ambigüedad surge cuando usamos en el nivel cuántico los modelos estándar de onda y partícula. Sin embargo, ésta desaparece en el nivel formal, donde los modelos se usan de manera no-estándar, a pesar de que no se pueda recuperar su precisión clásica. Ésta es la razón de que sea en el nivel formal desde el que brote la consecuencia de que no puede haber más modelos visualizables, porque ambos modelos están *sincronizados* en las fórmulas de tal forma que su integración nos incapacita para dar la imagen única y bien definida que exige una representación pictórica de la realidad. La diacronía del nivel empírico hace desaparecer cualquier inconsistencia por expresar una relación de exclusión o de incompatibilidad no cuántica sino clásica, la cual se vuelve compatible en el nivel formal a cambio de perder sus características de modelos estándar, con todas las consecuencias que esto conlleva. De este modo, la diacronía y la incompatibilidad se convierten en sincronía cuando se considera la totalidad de las situaciones experimentales y esta sincronía de ambos modelos es la que demanda el nivel formal, en la que los dos aspectos de los fenómenos ya están integrados en las fórmulas de Planck-Einstein-de Broglie, convirtiéndolos en modelos no-estándar, los cuales se vuelven compatibles a cambio de hacer una concesión a la función de visualizar o representar los objetos”, pp. 179-182.

renuncia completa de Heisenberg a las imágenes tendrá una importante consecuencia indeseable para Bohr: se perderá la posibilidad de describir físicamente los sistemas microfísicos, quedando únicamente la descripción matemática, a partir de la cual sólo podemos lanzar predicciones sobre los fenómenos atómicos, pero no ofrece explicación alguna sobre la realidad física que intentamos describir.

Bohr demuestra, refutando las ideas de Schrödinger, que no es posible tener imágenes pictóricas del mundo microfísico y que había que apartar de la representación objetiva *los procesos que tienen lugar en las categorías de espacio y tiempo*. Pero, entonces, ¿cómo se refieren ahora las descripciones espacio-temporales, tales como “onda” y “partícula”, a los sistemas que antes solían representar? Como ya he dicho, para Bohr se refieren de una manera analógica. A cuya tesis llegó siguiendo su principio de correspondencia, ya que la física clásica puede considerarse, según este principio, como un caso límite asintótico de la física cuántica.

Según la complementariedad, éste es el puente: la conexión de la teoría con la realidad se realiza a través de una *analogía* con los términos descriptivos de la física clásica. Sin embargo, el punto de partida de Einstein es el contrario:

“Einstein había dedicado el trabajo de toda su vida a investigar el mundo objetivo de los procesos físicos que se despliega allá fuera, en el espacio y en el tiempo, independientemente de nosotros, según leyes fijas. Los símbolos matemáticos de la física teórica debían reflejar este mundo objetivo, y con esto posibilitar las predicciones sobre su comportamiento futuro. Ahora se afirmaba, en cambio, que, si se descende al mundo de los átomos, no se da ya tal mundo objetivo en el espacio y el tiempo y que los símbolos matemáticos de la física teórica reflejan sólo lo posible, no lo fáctico. Einstein no estaba dispuesto - como él decía- a permitir que le quitaran el suelo de debajo de sus pies”¹⁷¹.

7) *Complementariedad de los conceptos cinemáticos y dinámicos. Magnitudes con sentido físico*. Con las dos formulaciones de la complementariedad se perseguía lo mismo: dotar de contenido intuitivo a la física cuántica. No obstante, con ambas soluciones se revelaron las siguientes renuncias: con la solución de Heisenberg se descubrió que se debía renunciar al determinismo; con la primera formulación de Bohr de la

¹⁷¹ HEISENBERG, W., *Penetrando en tierra nueva*. En: Diálogos sobre física atómica, p. 102.

complementariedad, entre los conceptos cinemáticos y dinámicos, a las imágenes visuales características del realismo clásico. Heisenberg y Bohr debatieron sobre la manera de recuperar el carácter intuitivo de la nueva teoría física, con el objetivo de mantener el ideal descriptivo y explicativo de la ciencia, pues aquella sólo puede ser intuitiva cuando es capaz de dar una descripción física de los fenómenos: comprensión, explicación y su descripción matemática.

Sin embargo, Heisenberg buscó la vía del contenido intuitivo a través de una perspectiva operacionalista, que le separa del camino que siguió Bohr: para Heisenberg una magnitud tiene *sentido físico si hay una operación de medida, mediante la cual le atribuimos un valor numérico*. Aunque este sentido físico de las magnitudes canónicamente conjugadas está limitado en física cuántica por el principio de indeterminación: más allá de los límites de este principio no se les puede atribuir ningún valor numérico bien definido, exacto; sólo aproximativo o estadístico.

Aquello que Bohr vio en el principio de indeterminación es la importancia que éste tiene en el uso que se realice de estos conceptos; es decir, su papel regulador a la hora de dotar de contenido intuitivo a la física cuántica, ya que establece la certidumbre máxima en la precisión de sus medidas simultáneas y con ellas el límite máximo con el que se puede dotar de contenido intuitivo a la física cuántica. Ya dije que este límite no coincide con las condiciones clásicas de la visualización de los sistemas físicos, pero es la condición necesaria para que el formalismo cuántico pueda aplicarse de forma inequívoca a los experimentos, como el de la cámara de niebla, y conectarse, así, con el lenguaje ordinario, el cual utiliza los conceptos descriptivos que se han construido sobre una base espacio-temporal.

De este modo Heisenberg estableció las condiciones formales de la conexión entre el formalismo matemático de la física cuántica y el lenguaje ordinario, a través de las nociones clásicas; pero esto no era suficiente para Bohr porque no aclaraba las condiciones materiales, esto es, el tipo de representación que aquéllas nos ofrecen de la realidad física dentro del contexto de la descripción cuántica.

8) *La representabilidad simbólica de la descripción física mecánico-cuántica*. Si se defiende, como hizo Bohr, que la física cuántica es una teoría completa que se refiere a la realidad, se ha de especificar, primero, cómo lo hace y, luego, justificar cómo lo consigue. Recuérdese que también se puede enfocar este mismo punto de otro modo: en filosofía del lenguaje se maneja una distinción lógica entre la intensión y la extensión de las palabras, de aquí que pueda entenderse el término “uso”

como la intensión del concepto, y “significado” como su extensión. Desde esta perspectiva la extensión que les atribuía la física clásica era la de hacer *referencia* a los objetos “reales”, entendiendo por ellos los objetos tal y como existen independientemente de la observación. En cambio, la extensión que la física cuántica les atribuye es *fenomenista*, en el sentido de que los conceptos se refieren a fenómenos, en los que se incluye el proceso de observación, y no a objetos en sí. Este cambio en el significado de los conceptos clásicos afecta a la intensión o al uso de los mismos, pues ésta es el conjunto de las condiciones que determinan si algo pertenece o no a la extensión del concepto, es decir, es la que establece los límites en la aplicabilidad de los conceptos, cuándo estos pueden ser aplicados a un objeto y cuándo no. Las condiciones de la intensión que maneja la física clásica de estos conceptos las constituyen sus propios postulados básicos. Como ya analicé, una de ellas era la del representacionismo pictórico de los objetos reales por parte de los conceptos, en tanto que ésta no forma parte de la intensión que la física cuántica les atribuye, la epistemología establecerá nuevas condiciones para la descripción objetiva que la apartarán del requisito clásico de representar objetos “reales” y, por tanto, ha de buscar algún otro que sí esté en concordancia con el nuevo uso y significado que se les ha atribuido en el ámbito de los fenómenos microfísicos. De ahí que ya no exista la necesidad de suponer que los conceptos físicos del lenguaje y la realidad comparten la misma estructura, en concreto un isomorfismo espacio-temporal, pues tales conceptos no representan la naturaleza de los objetos independientes de la observación, sino que describen fenómenos.

Esta fue la medida que tomó Bohr para disolver las paradojas y dotar de contenido físico a la descripción de la física cuántica, sin tener que renunciar al empleo de aquellos conceptos, pues sólo se renuncia a su sentido clásico como representaciones pictóricas de los objetos, donde se pierde su significado realista pero no su valor explicativo.

Aclararé, una vez más, que para Bohr, el *carácter no-intuitivo* de la física cuántica *se corresponde* con la *descripción estadística* de su formalismo matemático; pero cuando hace estas afirmaciones, dice “no-intuitivo” en sentido clásico, es decir, no existe una correspondencia directa de la teoría con la realidad a través de la representación ostensiva, espacio-temporal: la verdad ya no es aristotélica, “*correlatio rei*”. La correlación, ahora, se ofrece de una manera indirecta, a través de una aproximación asintótica con los conceptos clásicos (construidos sobre la base de la continuidad); situación que se manifiesta en el nivel teórico por el carácter estadístico de sus leyes.

En el modelo de inteligibilidad, que propone Bohr, la referencia empírica de un concepto ya no es el objeto físico en sí mismo; los conceptos descriptivos, en su uso analógico, tienen por referencia al fenómeno. De modo que el contenido intuitivo de las teorías físicas no está basado en un “representacionismo objetivo”, sino en una “representación simbólica” de la realidad, cuyo simbolismo implica que el objeto ya no es lo representado y que la realidad no se nos “manifiesta”, espacio-temporalmente, como de hecho es; sólo pueden construirse modelos o “imágenes” analógicas, donde, únicamente, se representan aproximaciones asintóticas, semejanzas, no idénticas, con la realidad. Esto es consecuencia de aquello que nos ha mostrado la física cuántica: la naturaleza, el mundo físico, no se ajusta exactamente a nuestras formas ordinarias de percepción y de entendimiento. Siguiendo esta idea, en su momento pude afirmar¹⁷² que Bohr propuso el uso analógico de los conceptos clásicos partiendo de una combinación entre su teoría fenoménica de las propiedades físicas y de la medición junto a la apelación que realiza de la existencia de los objetos atómicos, a los que aluden aquellas propiedades, pero sin representarlos pictóricamente ya que no pertenecen en exclusiva al objeto, sino al fenómeno.

¹⁷² “Aunque es cierto que los objetos ya no están pictóricamente representados por los conceptos “sustancialistas”, sí que conservan un uso analógico con respecto al clásico, en su tipo de referencia que hacen del objeto. El uso simbólico de los conceptos clásicos es lo que les da un significado inambiguo dentro de la física cuántica. Así pues, el puente entre el lenguaje ordinario y el formalismo matemático es este uso simbólico. Y todo ello por satisfacer la necesidad de dar un modelo espacio-temporal de los fenómenos cuánticos sin tener que recurrir a su representación pictórica de imagen visual.

Con esto, se consigue salvar en parte los conceptos clásicos y la posibilidad de la interpretación física de dichos modelos, y no tener que conformarse únicamente con su descripción matemática. Lo que se pierde es el contenido de la interpretación física al modo clásico: el determinismo, la representación pictórica de los conceptos, la objetividad vinculada a una realidad independiente y, en definitiva, todas las características del marco clásico que han ido apareciendo en esta exposición (...).

Así pues, renunciar a la teoría clásica desde la complementariedad no significa renunciar a los conceptos “clásicos”, sino al *uso* que esta teoría hace de ellos, al *significado* que desde él se les atribuye y a la *epistemología* a la que dan lugar. (...) Al cambiar la referencia de los conceptos dándole un carácter fenoménico, las teorías buscarán los requisitos para su objetividad en la descripción fenoménica, en un lenguaje inambiguo basado en la intersubjetividad y no en el carácter ontológico de la representación de objetos reales. Ésta es la razón de que a Bohr le interese más hablar de epistemología que de ontología, pues en este punto el requisito de la *descripción objetiva* se aparta y se independiza de la noción ontológica de *realidad independiente*”, pp. 232-234.

De esta manera fue como llegué a la misma conclusión anterior: “renunciar a una teoría por otra no es renunciar a los conceptos en sí mismos, pues éstos no son propios de ninguna teoría, sino del fenómeno que permanece invariable en cuanto a su valor fenoménico. Lo que cambia es nuestra comprensión de él, que se manifiesta en el uso y el significado que atribuimos a los conceptos dentro de una teoría u otra. Por tanto, que no podamos “inventar” nuevos conceptos es indicio de que las teorías físicas no son meros instrumentos arbitrarios creados por el hombre (pues alguna relación con el mundo-objeto han de tener, pero nunca más la de representarlo tal cual es), aunque la complementariedad sostenga, en oposición al marco clásico, que en la predicción sólo necesitamos este valor instrumental de las construcciones teóricas”.

d) Conclusión: la mecánica como estudio de la materia en movimiento

El recorrido realizado hasta ahora a través del mundo cuántico lleva a admitir el carácter auténticamente revolucionario de la nueva física. Ya en los dos primeros capítulos se descubrió que el concepto clásico de movimiento no se ajustaba a las condiciones impuestas por el postulado cuántico. La presencia de h en los intercambios energéticos y en el interior de la materia fue el preludio de su aparición como factor regulador y organizador de todas las operaciones de la Naturaleza, incluida la trayectoria de un móvil. El carácter discreto del cuanto de acción invalida dicha concepción clásica porque ésta se basaba en la continuidad de todas las acciones naturales, lo cual permitía idealizar las condiciones del concepto de posición y movimiento de tal forma que la teoría clásica podía determinar, en todo instante, la posición de un cuerpo aunque se estuviera moviendo. En la actualidad, a pesar de ser un hecho que concuerda con la forma humana de experimentar el movimiento, tal situación se ha revelado imposible, pues la discontinuidad esencial de la Naturaleza obliga a *afinar* nuestra concepción acerca de aquél, ya que la presencia de h impide combinar ambos valores al mismo tiempo y con la misma exactitud.

El significado filosófico de tal prohibición se aproxima mucho a la concepción bergsoniana del movimiento y a las paradojas de Zenón, que en el nivel mesofísico parecen exageraciones que no aluden a nada real y que contradicen el sentido común. Pero, nuestra forma habitual de pensar no siempre *sobrevive* a un análisis detallado y a la reflexión filosófica, como ocurrió en este caso. A pesar de lo sensato que pueda parecer la idea clásica de movimiento, en la que la descripción cinemática se combina

perfectamente con la dinámica, más sencilla es la idea contraria si se parte de consideraciones puramente dinámicas, las cuales no se ajustan a nuestra percepción visual, acostumbrada al hecho de “cinematografiar” imágenes fijas, dándoles la apariencia de movimiento. Las condiciones cuánticas nos fuerzan a partir de la falsedad de tal imagen y a concebir el movimiento de un modo más puro, sin mezclarla con los factores estáticos propios de la localización geométrica, pues un móvil no puede tener una posición bien definida en el espacio a menos que lo paremos, pero en este caso ya no podremos conocer sus características dinámicas, ya que ha detenido su movimiento. Podríamos conocer aquéllas que tenía antes de pararse y *suponer*, como hacía la mecánica clásica, que se conservan igual, antes y después de cambiar de estado, frenando su movimiento. Pero esto es sólo un supuesto.

En otras palabras, si un sistema físico tiene un estado dinámico bien determinado no puede darse una descripción geométrica bien definida de su localización espacio-temporal, puesto que aquél carece de tal precisión en el valor de sus magnitudes cinemáticas y viceversa; el mundo, en el nivel atómico, obliga a elegir entre una de estas dos descripciones o bien a sacrificar la precisión de ambas, conformándonos con manejar valores de probabilidad, si es que preferimos disponer de los dos tipos de magnitudes.

La nueva teoría del movimiento, la mecánica cuántica, abandona el púlpito de las idealizaciones teóricas y antropomórficas y se vuelve más sutil y rigurosa, al menos desde el punto de vista filosófico, en sus concepciones y objetivos mecanicistas, los cuales ya no se podrán ajustar al ideal cartesiano de describir el dinamismo del mundo geoméricamente, a través de figuras y movimiento. Pero, si tal fue el objetivo fundamental con el que nació la mecánica, ¿tenemos, entonces, derecho a denominar “mecánica cuántica”, la teoría del movimiento, a esta física que no se corresponde con la doctrina clásica? Ésta fue una de las objeciones que planteó a la física atómica Einstein, el más importante, por la lucidez de su crítica, de los adversarios de esta teoría.

Profundizando en las mismas ideas, se da con objeciones más poderosas, pues lo decisivo en la nueva versión del concepto de movimiento es que la imprecisión que conlleva es teórica y experimental, lo cual inclina a pensar que se trata de un hecho fundamental de la propia Naturaleza, y no de un límite humano como pensaba Einstein, quien se opuso a atribuir carácter objetivo a la indeterminación de las magnitudes canónicamente conjugadas, pues con ello no sólo se pondría en duda la validez de la concepción mecánica de la realidad física, sino también el

ideal determinista. A Einstein le pareció que estas implicaciones eran inaceptables para la ciencia, y que, por tanto, la física cuántica era incompleta; sin embargo, la corroboración experimental siempre se decantó a favor del carácter esencialmente indeterminista de la Naturaleza, que es el reflejo del carácter discontinuo y estadístico del formalismo cuántico.

El indeterminismo cuántico propicia una ciencia más “humana”, en el sentido de imprevisibilidad de la acción hasta que ésta no se haya realizado: el futuro es esencialmente incierto porque el presente no tiene todas sus condiciones bien definidas hasta que no se ha convertido en pasado, es decir, hasta que las propiedades físicas del sistema no hayan sido medidas. De forma que, la física cuántica acabó con el materialismo atomista de los siglos XVII y XVIII al tiempo que con el determinismo decimonónico, en el que había culminado el anterior como consecuencia y corolario glorioso de la ciencia clásica.

Pero, continuando con la andadura por el universo cuántico, se descubren otras características aún más problemáticas y tan peculiares como novedosas para la física. El carácter discreto y probabilístico de la nueva teoría elude la gran paradoja onda-corpúsculo, que está impresa en las primeras fórmulas. Este dilema queda erradicado del esquema matemático de la mecánica matricial y de la mecánica ondulatoria, como se vio en el tercer capítulo, pero, a cambio, imponen no sólo una indeterminación esencial a la Naturaleza, sino también la insuficiencia de los modelos visuales y una interacción ineludible entre el mundo que observamos y el científico. Con lo cual, se ha perdido la posibilidad de describirlo visual y objetivamente, según el criterio del realismo clásico. En consecuencia, la dualidad onda-corpúsculo desaparece en el nivel del formalismo cuántico, pero su sombra aún enturbia el panorama de la física, pues la paradoja se disuelve a cambio de hacer importantes concesiones a la descripción mecánica de la Naturaleza: cuando Heisenberg elaboró su mecánica matricial redujo la física a matemáticas, al trabajar sólo con las propiedades estrictamente mensurables, de modo que, aquélla perdió el carácter intuitivo-representativo, concretamente el valor del referencialismo-pictórico (ostensivo), que le había acompañado siempre; se volvió abstracta, vaciándose de todo su contenido físico; adquirió una gran consistencia teórica, cuyo valor operativo es aun mayor que el de su predecesora, pero carecía de todo valor explicativo. Sin una interpretación del formalismo se puede saber cómo se comporta el mundo físico pero no por qué.

Esta nueva base teórica abarca también un nuevo tipo de descripción, que puede denominarse, siguiendo las ideas de Bohr,

“complementaria”, pues posee rasgos tan exclusivos que merece una nueva caracterización y adjetivación para distinguirla de la descripción clásica, con la que *comparte los mismos fines*: ser una descripción completa, exhaustiva y descriptiva de los fenómenos físicos; *pero no sus medios*: el determinismo y el representacionismo clásicos.

No obstante, el cambio más radical en esta nueva forma de interpretar la teoría es que sólo podemos concebir los fenómenos clásicamente incompatibles como complementarios si pensamos en sus propiedades físicas como “atributos de estado fenoménicos” y no como “propiedades sustanciales” referidas a objetos, donde éstos estarían pictóricamente representados por los conceptos.

Esto reconduce la situación a aquellos tres problemas epistemológicos, analizados en el tercer capítulo, como tres facetas de la problemática realista: se puede concluir que la constante de Planck hace imposible la explicación causal-determinista, la objetividad (interacción observacional es intercambio de energía, donde h pone su límite a la reducción) y, al ser la causante de la dualidad, impide dar una descripción unívoca de la realidad, pues ya no hay un único modelo. Es cierto que estos tres problemas (objetividad, determinismo y contenido intuitivo) están relacionados porque, en definitiva, son los tres aspectos que puede tomar el problema global del realismo: son los tres ropajes que revisten al realismo; sus tres caras. Son, en definitiva, los tres campos de cultivo exclusivos donde el realismo puede echar raíces y estas tres formas de plantearlo son las siguientes.

En primer lugar, el problema del realismo se cierne sobre la cuestión de la objetividad cuando se la vincula, como hizo la física clásica, a la noción de “realidad física independiente”; pero, puede ser expulsado del terreno de la objetividad cuando se traslada esta cuestión desde el ámbito ontológico hasta el lenguaje, como hizo Bohr, afirmando que la objetividad científica sólo puede exigir ser “comunicación sin ambigüedad”.

En segundo lugar, el realismo también puede plantearse en el terreno del determinismo en la medida en que este ideal supone que podemos definir con toda precisión y simultáneamente el valor de las propiedades mecánicas, cinemáticas y dinámicas, porque son “propiedades objetivas” que el sistema bajo observación posee en sí mismo y, por tanto, aunque haya una alteración o perturbación de sus valores por el acto de medir, aquéllas *poseen* unos valores concretos, precisos y bien definidos, que, de una manera u otra, el científico puede llegar a conocer.

No obstante, del mismo modo que con el tema de la objetividad, también se puede exorcisar al realismo del ámbito determinista siguiendo a Bohr: no hay “alteración” o “perturbación” de los valores de las propiedades mecánicas por parte de la medición, sino que es la propia interacción observacional entre el dispositivo de medida y el objeto observado la que hace posible que las propiedades mecánicas adquieran un valor definido (es la que precisa el valor de las propiedades mecánicas del sistema bajo observación). Por tanto, éstas no son propiedades objetuales u “objetivas”, en el sentido clásico, dado que sólo tienen sentido (un valor bien definido y preciso) cuando han sido medidas; es la propia interacción observacional la responsable de que estas propiedades adquieran valores exactos, de ahí que se las considere propiedades fenoménicas, que pertenecen tanto al objeto como al dispositivo experimental.

La conclusión a la que se llega es que el indeterminismo cuántico tiene un valor objetivo y no es un indeterminismo gnoseológico sino físico, *real*: el mundo físico está esencialmente indeterminado en términos mecánicos. Por tanto, el criterio determinista como un criterio de realidad, desde el que plantear el problema del realismo, también es abolido desde la filosofía de Bohr: la concepción realista del mundo y de la ciencia necesita que haya causalidad, pero no, necesariamente, que sea una causalidad determinista.

Por último, y en tercer lugar, el tema del realismo está relacionado con la cuestión del “contenido intuitivo” de las teorías en la medida en que este contenido es el responsable de la conexión gnoseológica entre teoría y realidad; es el puente entre la exterioridad del mundo que estudiamos y nuestras formas de entender, conocer y comunicar lo que hemos aprendido de él; por lo tanto, toda teoría ha de tener “elementos objetivos” que la conecten con la realidad; elementos que ésta comparte con el entendimiento humano. El contenido intuitivo de la física clásica está basado en imágenes espacio-temporales, cuya capacidad de visualizar la realidad depende de que usemos un sólo modelo unívoco de aquellas imágenes; además, el lenguaje ordinario es la base indispensable de toda posible interpretación del formalismo cuántico y es el que aporta el contenido físico de la teoría cuántica a su esquema matemático porque dicho lenguaje es el único que conecta la teoría con la realidad, a través de nuestra experiencia ordinaria.

Tras el fracaso de la descripción espacio-temporal, en tanto proveedora de imágenes pictóricas y de un modelo unívoco para cada fenómeno, la tesis de Bohr es que los conceptos clásicos se podrán seguir usando, pero no como representaciones pictóricas de la realidad, sino como “analogías” (gracias al principio de correspondencia), cuya referencia ya no

es *exacta* sino *asintótica*: para conservar algo del significado físico se ha de partir de tal dependencia asintótica de los conceptos con la realidad de nuestra experiencia ordinaria. Pero, más adelante, plantearé el problema de cómo atribuir este contenido físico, propio de las teorías clásicas, al formalismo cuántico sin recurrir a las imágenes visuales de la física clásica.

En definitiva, el objetivo fundamental de Bohr fue ofrecer un nuevo marco teórico a la física cuántica, desde el que se pudiera recuperar la objetividad y el contenido físico. Y esto a pesar de que el proceso de rescate haya cambiado los rasgos más esenciales de tales características. El significado físico de una teoría y la objetividad resurgen en un sentido totalmente nuevo: el primero tendrá que esforzarse por explicar pero sin aludir a nada visual; su nueva misión será la de ofrecer un modelo no-ostensivo de la realidad, que nos recuerde constantemente que no existen representaciones exactas del mundo físico; en cuanto a la segunda, tendrá que adaptar su significado a tal situación, en la que se ha perdido la posibilidad de describir los fenómenos como entes objetuales. La nota característica del sentido físico de los términos será ahora el simbolismo, en tanto que la objetividad hará caer su significado en las condiciones intersubjetivas de este tipo de lenguaje, en el que se disuelven las paradojas, y que aporta una información inequívoca acerca de los sistemas atómicos.

La situación ha quedado así: si se renuncia al determinismo, a los modelos visuales, a la objetividad clásica y al principio de realidad, supuesto en todos los anteriores, puede aceptarse sin reparos la interpretación de la complementariedad, pues ni ella ni el formalismo matemático poseen incoherencia alguna, y, además, están estrechamente vinculados. Ahora bien, la cuestión está en si se está dispuesto a hacer tales concesiones. Einstein pensaba que tal renuncia científica es inadmisibles, pero Bohr defendió la postura contraria y buscó alternativas filosóficas que sustituyeran a los ideales descriptivos clásicos. Difícil tarea la que se propuso, pero más difícil es seguir creyendo en aquellos ideales, una vez que han perdido el apoyo experimental y teórico del que habían disfrutado durante la “era clásica”.

La última palabra la tiene el investigador; él será quién decida orientar sus trabajos hacia una dirección o hacia otra, porque ambas posturas han abierto nuevos campos de experimentación y de teorización. La propuesta de Einstein dio lugar a una búsqueda de las llamadas “variables ocultas”, que ha cristalizado en una serie de extravagantes teorías, más extrañas incluso que la mecánica cuántica, en las que no se consigue restaurar el principio de localidad, que la doctrina de los cuantos

invalidó. Hecho aquél que hubiese sumido a Einstein en la desesperación, de haber vivido lo suficiente para conocerlo, pues este rasgo es uno de los que se consideran fundamentales para mantener el ideal clásico de la ciencia física. No obstante, es la física cuántica la que se ha mostrado más fructífera, no sólo por sus innumerables aplicaciones técnicas y por sus éxitos predictivos, sino también por todas las nuevas vías de estudio que ha abierto, como la física de partículas elementales y la de superfluidos y supraconductores; además de sus aplicaciones a la ciencia cosmológica y la física cuántica de campos. Por otro lado, también se espera conseguir una armonía entre las condiciones cuánticas y relativistas, que dé lugar a una teoría unificada de ambas físicas. Si esto ocurriera, éste sería el punto donde el marco teórico de la física cuántica tendría que ser revisado, siguiendo la enseñanza de la lección epistemológica, para adaptarse a una situación más general, con el fin de descubrir nuevas relaciones armónicas que abran las puertas a los aún desconocidos campos de experiencia y a nuevos caminos hacia la evolución del conocimiento científico.

Sin embargo, la complementariedad tiene un punto débil, al que se aferran los detractores de la física cuántica. La insatisfacción que sienten hacia esta teoría es por el tipo de ontología que frecuentemente se le ha atribuido, si es que se le atribuye alguno. Esta objeción se debe a la acusación de fenomenista que recayó sobre Bohr; una acusación injustificada, ya que la interpretación de la física cuántica que propone la complementariedad no tendría razón de ser si no pretendiera dar una explicación realista del mundo cuántico. Es decir, si las propiedades, aunque fenoménicas, no hicieran referencia a un objeto, no sería necesario concebirlas como complementarias, pues aquello que están complementando es toda la información inequívoca que se puede obtener de un mismo *objeto*.

Ahora bien, el elemento clave de todo esto es el papel que la relación sujeto-objeto tiene en el conocimiento; generalmente, sobre todo entre los físicos, sólo se ha considerado realista la postura epistemológica que elimina al sujeto de la actividad gnoseológica. De momento, esta cuestión sólo puedo dejarla planteada: la complementariedad acabó con la ontología tradicional que había acompañado a la física hasta entonces; no obstante, puede haber una alternativa, aunque ésta habrá de tener en cuenta los rasgos epistemológicos, que he desarrollado en esta exposición. Por tanto, el estudio acerca del tipo de ontología que le conviene a esta filosofía ha de partir de la nueva idea de objetividad, ofrecida por Bohr; la nueva unión, que se da en física entre el sujeto y el objeto, nos guía hacia una concepción del mundo y del conocimiento que diverge del realismo clásico,

alejándose más de él según vamos profundizando en nuestro conocimiento de la Naturaleza.

En la medida en que la filosofía ya entrevió tal situación, puede orientar en la búsqueda de la solución a la cuestión anterior, pero sin olvidar que ésta se ha planteado desde el campo de la ciencia y no desde el plano filosófico, lo cual le otorga, ya de por sí, el rango de novedad, que ninguna doctrina filosófica pudo predecir, por tanto, ninguna se ajustará exactamente a las exigencias epistemológicas que la complementariedad plantea a la ontología, de ahí, la importancia de ésta, su independencia de toda otra concepción filosófica, que no sea la suya propia, y su idiosincrasia. En el último capítulo, me adentraré en estas cuestiones ontológicas y de fundamentación filosófica, porque quizás sí haya una tesis que se le aproxime: el modelo intuicionista de la matemática.

En conclusión, si se usan los conceptos clásicos con la intención de formar una imagen del objeto, al que se le ha aplicado tal concepto, hemos de conformarnos con una imagen “borrosa” o difusa de la realidad, ya que sólo representan analógicamente a los objetos, a través de una relación de semejanza o similitud con aquello que “realmente” son. La filosofía de la complementariedad propone este uso analógico, como una aproximación asintótica a la realidad, en lugar del uso pictórico del marco clásico, donde la relación entre el concepto y el objeto era una relación de *identidad lingüística*: el objeto poseía en sí mismo cualidades idénticas a las propiedades con las que se le describía a través de su concepto. Evidentemente, no podía tratarse de una *identidad material*, ya que el lenguaje es un conjunto de signos y grafías: un mediatizador simbólico entre el objeto y nuestro entendimiento. De modo que todo concepto es, *lingüísticamente hablando*, un símbolo; pero Bohr no se refiere a esto cuando habla del uso simbólico del lenguaje clásico, ya que dentro del marco clásico los conceptos, aun siendo símbolos lingüísticos jamás se consideraron símbolos, *hablando físicamente*.

Para la complementariedad, los conceptos no son sólo símbolos del lenguaje sino, además, *símbolos de la realidad*: representaciones analógicas, semejanzas asintóticas con la realidad, pero nunca más representaciones exactas, donde las características que se expresan con nuestras descripciones lingüísticas son idénticas a las cualidades de los objetos, de modo que las propiedades físicas objetivas son, además, objetuales, o sustanciales. Dicho esquemáticamente, la relación de identidad entre lenguaje y realidad, que se había supuesto tácitamente en toda la historia de la ciencia hasta la aparición de la teoría cuántica, se tambalea para dar paso a una relación de semejanza, o aproximación,

simbólica, donde se ha cambiado el signo de identidad por el de aproximación: ya no se trata de $A=A$ ni tan siquiera de $A\neq A$, sino de $A\approx A$; éste es el “juego tembloroso”, inseguro, difuso y turbio, *shaky game*, que la física cuántica propone a la teoría del conocimiento y cuyas reglas Bohr explicitó en su “lección epistemológica”. Con él se pierde exactitud lingüística, pero se gana una exactitud matemática que abre las puertas de un mundo que no puede ser entendido de otra manera.

A continuación, demostraré que, en realidad, la polémica Einstein-Bohr está planteada en estos términos y el problema, que tanto Heisenberg como Bohr pretendieron resolver fue éste: el del contenido intuitivo de la física cuántica a través de su relación con los términos descriptivos de la física clásica, que están cargados de significado físico.

CAPÍTULO V:

«EINSTEIN: UNA RÉPLICA A BOHR»

Einstein no asistió a la “Conferencia de Como”, donde Bohr presentó su interpretación de la mecánica cuántica. Más tarde, Bohr leyó el mismo escrito en el *V Congreso Solvay*, esta vez en presencia de Einstein. Pero, para sorpresa de Bohr, aquél se mostró en desacuerdo con la complementariedad, el principio de indeterminación y, en general, con la descripción de la realidad dada por la física cuántica como teoría completa.

Esta popular polémica inició el debate acerca de la naturaleza de toda descripción física; cuestión, ésta, fundamental, que se presentó bajo la forma de si la mecánica cuántica describe o no estados reales del mundo físico. El objetivo de la complementariedad fue salvar las ambigüedades que la dualidad onda-corpúsculo había introducido en la Física, pero la fórmula fenomenista con la que Bohr resolvió este problema abrió las puertas a la controversia con Einstein acerca del realismo con el que la Ciencia pretende describir el mundo.

Estructuraré en tres fases la evolución de la postura crítica desde la que Einstein polemizó con Bohr acerca de la mecánica cuántica. El primero es el de las Conferencias Solvay, entre 1927 y 1933. El segundo se concentra en un año, 1935, cuando Einstein, Podolsky y Rosen publican su famoso artículo en contra del *desarrollo actual* de la teoría de los cuantos y Bohr les responde con otro artículo, publicado en la misma revista, apenas dos meses después. Por último, a partir de 1935 y hasta la fecha de la muerte de Einstein, en 1955, puede hablarse de un tercer momento en la polémica Einstein-Bohr, ya que el primero, aun sin cambiar el contenido de su crítica, se muestra más tajante que antes en sus afirmaciones en contra del positivismo creciente que sus colegas defienden y que él mismo ve que se está afianzando en el ámbito científico. Para fortalecer su postura construirá una alternativa epistemológica a la interpretación de Bohr, desde la cual pretende ofrecer una base más sólida a las reiteradas apelaciones a su “instinto científico” y a la máxima: “Dios no juega a los dados”¹. Las

¹ En múltiples ocasiones, Einstein hizo declaraciones como ésta: “Es posible creer esto sin incurrir en contradicción lógica, pero resulta tan contrario a mi instinto científico que no puedo abandonar la búsqueda de una descripción más completa”. EINSTEIN, A., Mis Ideas

dos primeras fases se expondrán en el primer apartado; la última será analizada más tarde, tras haber visto la respuesta con la que Bohr se defendió del ataque de Einstein.

5.1) *El Argumento EPR: ¿Por Qué es Incompleta la Mecánica Cuántica?*

A lo largo de este apartado, como en el siguiente en relación con la respuesta de Bohr, mi intención es meramente expositiva con el objetivo de evitar el partidismo; el análisis de las dos posturas y mi propio enfoque de ambas lo realizaré más adelante.

¿Es la mecánica cuántica una descripción “completa” de la realidad? Al leer tanto los escritos de Einstein como los de Bohr, en relación con las discusiones que ambos mantuvieron, nos encontramos con que el término “completa” fue usado con diferentes significados.

En un principio, Einstein intentó demostrar que la mecánica cuántica no era una teoría completa en el sentido de no ser una *teoría matemáticamente correcta*, porque no se adecuaba a ciertos fenómenos atómicos: durante las Conferencias Solvay, Einstein atacó esta teoría con argumentos físicos, esperando descubrir alguna incoherencia matemática interna o algún desacuerdo de sus consecuencias teóricas con los resultados experimentales. No lo consiguió y tuvo que aceptar que la mecánica cuántica era *completa*, pero, únicamente en este sentido, en el nivel matemático de la teoría².

Más tarde, en 1935, debido a su anterior fracaso, cambia los argumentos físicos por otros filosóficos. Éstos se basan en dos pilares

y Opiniones, p. 287. O como ésta, en una carta dirigida a Born en el año 1926: “La mécanique quantique force le respect. Mais une voix intérieure me dit que ce n’ est pas encore le *nec plus ultra*. La théorie nous apporte beaucoup de choses, mais elle nous rapproche à peine du secret du Vieux. De tout façon, je suis convaincu que lui, au moins, ne joue pas aux dés”. EINSTEIN, A./ BORN, M., Correspondance 1916-1955, carta 52 de Einstein, fechada el 4 de diciembre de 1926, p. 107. O como esta otra, dirigida a su amigo Besso: “Yo defiendo allí al Buen Dios contra la idea de un pretendido juego de dados continuo”. EINSTEIN, A./BESSO, M., Correspondencia con Michele Besso, carta 165 de Einstein, fechada el 30 de noviembre de 1949, p. 376.

² Es cierto que una teoría no acaba nunca de completarse; más aún, cuantos más campos de investigación abra, más rica y fructífera es. No obstante, la base y los fundamentos teóricos de la física cuántica quedaron firmemente establecidos en 1927, de manera que: “Todos los futuros desarrollos de la teoría cuántica fueron generalizaciones naturales o apéndices de aquel núcleo teórico que había sido edificado en los primeros 27 años de nuestro siglo”. SELLERI, F., El debate de la teoría cuántica, p. 18.

básicos: la “condición de completud” y su “criterio ontológico”, construido a partir de una concepción clásica (determinista) de la realidad física. Ahora, el término “*incompleta*” se refiere a que la descripción mecánico-cuántica sólo es una descripción acabada a nivel matemático-teórico, pero es una *descripción indirecta de la realidad*, dado su *carácter estadístico*. Seguiré a Einstein cuando argumenta que esta descripción estadística, nacida del indeterminismo, carece de fundamento físico, es decir, de una base conceptual adecuada, que conecte la teoría con la realidad, ya que su criterio ontológico establece que sólo la descripción determinista alcanza tal objetivo y, por lo tanto, la mecánica cuántica no es una teoría *realista*, pues no *describe* fielmente ninguna *realidad extralingüística*.

Por consiguiente, mi propuesta será que la acusación de Einstein no va dirigida al indeterminismo como objetivo principal, sino que consiste en lo siguiente: la mecánica cuántica es una *teoría incompleta* porque *carece del contenido físico* necesario para describir la realidad física tal cual es, en el sentido estricto que expuse en el segundo capítulo, cuando me referí al *contenido intuitivo del formalismo cuántico*.

Durante este capítulo y el siguiente desarrollaré y justificaré esta tesis, desde la cual no pretendo negar que una de las características de esa realidad, que Einstein defiende, sea el determinismo pues, además, el carácter estadístico e indeterminista de la física cuántica es, ciertamente, el motivo por el que Einstein piensa que no existe tal conexión “intuitiva” o “física” con la realidad. Por ello, siempre hay en sus escritos declaraciones a favor de aquél y algunas tan líricas como ésta:

“Todo está determinado, tanto el principio como el final, por una fuerza que escapa a nuestro control. Está determinado tanto el insecto como la estrella. Los seres humanos, los vegetales o el polvo cósmico, todos bailamos una extraña melodía, entonada en la distancia por un flautista invisible”³.

Bohr no responderá a estas objeciones con argumentos ontológicos como los de Einstein, acerca de la presencia de elementos objetivos en las teorías físicas, sino con la epistemología que había construido desde su filosofía de la complementariedad.

La polémica quedó sin resolver.

³ EINSTEIN, A., *The Saturday Evening Post*, 26 Oct. 1929, p. 17. Citado por A. J. Friedman y C. C. Donley en: [Einstein as myth as muse](#), p. 127.

a) Los dos Congresos Solvay: 1927 y 1930

Antes de exponer el argumento que Einstein, Podolsky y Rosen defendieron en su famoso artículo⁴ de 1935, me detendré en aquello que se puede considerar los antecedentes de éste: las ideas que Einstein discutió durante los dos Congresos Solvay, en los que coincidió con Bohr⁵, y que muestran la evolución de la postura crítica que Einstein mantuvo respecto a la teoría cuántica. Durante la celebración de éstos, el físico alemán aún esperaba descubrir alguna incoherencia teórico-matemática en el seno de la nueva física. Con este fin elaboró una serie de experimentos ideales, que fueron refutados uno a uno por Bohr⁶.

El primero de estos Congresos tuvo lugar en el año 1927, se trataba del V Congreso de Física del Instituto Solvay, dedicado al tema “Electrones y fotones”⁷, presidido por Lorentz y al que asistieron Planck, de Broglie, Schrödinger, Heisenberg, Langevin, Compton, Ehrenfest, Born y Dirac, entre otros. En esta ocasión Bohr repitió la misma conferencia que expuso en Como: el significado de la complementariedad y la consiguiente renuncia al marco conceptual de la física clásica⁸.

A Einstein no le satisfizo tal lectura de la mecánica cuántica, en concreto que se hubiera abandonado la descripción causal en el espacio y

⁴ Se trata del artículo que A. Einstein, B. Podolsky y N. Rosen escribieron para la revista *Physical Review*, vol. 47, año 1935, bajo el título de “Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?”, pero que se conoce, comúnmente, con el nombre de “E-P-R”. También está publicado y traducido al francés en: EINSTEIN, A. (Oeuvres Choiesies I), *Quanta. Mécanique statistique et physique quantique*, pp. 224-230.

⁵ Hubo un tercer Congreso en 1933 que se dedicó a los problemas de la estructura y propiedades de los núcleos atómicos, pero, aunque asistió Bohr, Einstein no estuvo presente.

⁶ Las intervenciones de Bohr no fueron recogidas en las actas de este Congreso, pero él mismo transcribió las discusiones que mantuvo con Einstein en un artículo de 1949 titulado “Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics” y que se publicó en la obra del editor P.A. SCHILPP: *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, pp. 201-241. También lo podemos encontrar en castellano en: *Física atómica y conocimiento humano*, pp. 40-82.

⁷ Institut International de Physique Solvay, *Électrons et Photons. Rapports et discussions du Cinquième Conseil de Physique*, 1927, París, Gauthier-Villars, 1928.

⁸ Para un análisis más detallado de las discusiones durante estos congresos, consúltese: JAMMER, M., *The Philosophy of Quantum Mechanics*, pp. 108-158.

tiempo⁹. Para demostrar que esta renuncia era sólo provisional y que se podía aspirar a dar una descripción de los fenómenos atómicos más completa, esto es, determinista, propuso el primer ejemplo, el de las “partículas libres”.

Este sencillo experimento consistía en imaginar una partícula cualquiera atravesando el orificio de un diafragma colocado delante de un segundo diafragma con dos orificios y detrás de éste una placa fotográfica¹⁰. Con él pretendía demostrar que se podía dar una descripción detallada de la energía y de la cantidad de movimiento de la partícula, en los procesos individuales, con sólo observar las diferentes líneas de interferencias que aquélla produce al pasar por una rendija o por la otra del segundo diafragma, ya que la cantidad de movimiento transferida al primer diafragma es distinta en cada uno de los dos casos. No obstante, este experimento imaginario sólo sirvió para que el propio Bohr realizara el carácter de exclusión mutua de las condiciones experimentales¹¹:

“Un examen más profundo mostró, sin embargo, que el control propuesto de la cantidad de movimiento transferida entrañará una incertidumbre en el conocimiento de la posición del diafragma, lo que impediría la aparición del fenómeno de interferencias en cuestión (...). Este punto es de gran importancia lógica, puesto que sólo el hecho de que nos hallamos ante una elección: seguir la trayectoria de la partícula *o bien* observar efectos de interferencia, nos permite eludir la conclusión paradójica de que el comportamiento de un electrón, o de un fotón, dependería de la presencia en el diafragma de una rendija a través de la cual pueda demostrarse que no ha pasado. Nos encontramos aquí con un caso típico de cómo los fenómenos complementarios aparecen en condiciones experimentales que se excluyen entre sí, ejemplo que nos enfrenta con la imposibilidad, en el análisis de los efectos cuánticos, de trazar una separación rígida entre un comportamiento independiente de los objetos atómicos y su interacción con los instrumentos de medida que sirven para definir las condiciones de aparición de los fenómenos”¹².

⁹ El motivo por el cual Einstein no pudo aceptar esto se expondrá más adelante; de momento, sólo apuntaré que la renuncia a este tipo de descripción causal entra en contradicción con su teoría de la relatividad.

¹⁰ Cf. EINSTEIN, A., *Intervention au Cinquième Conseil de Physique Solvay*. En: Quanta. Mécanique statistique et physique quantique, pp. 210-212.

¹¹ Cf. BOHR, N., *Discusión con Einstein sobre problemas epistemológicos de la física cuántica* (1949), pp. 52-61. En: Física atómica y conocimiento humano.

¹² *Ibid*, p. 58.

El segundo ejemplo, el del “espejo semiplateado”, también fracasó en su objetivo de encontrar alguna incoherencia matemática en la teoría cuántica y, únicamente, consiguió ilustrar, en palabras de Bohr, “el grado en el cual se nos impone la renuncia a la visualización de los fenómenos atómicos, a causa de la imposibilidad de su subdivisión”¹³. El experimento consiste en colocar un espejo semiplateado en la trayectoria de un fotón, para ofrecerle dos direcciones posibles de propagación, y una placa fotográfica situada al final de cada una de estas direcciones: el fotón sólo puede ser registrado en una de estas placas, nunca en las dos, por ello podemos concluir que el fotón “ha elegido”, por decirlo así, uno de los dos caminos posibles para propagarse por él. Sin embargo, si sustituimos las placas fotográficas por espejos normales, podemos observar efectos de interferencias entre los dos trenes de ondas reflejados, los cuales provienen de los dos posibles caminos que el espejo semiplateado ofrece al fotón; así, hemos de afirmar que el fotón se ha comportado como si hubiese pasado por ambos.

Bohr sostiene que para evitar esta paradoja se ha de renunciar a la representación espacio-temporal del comportamiento del fotón, ya que, cuando tratamos con *fenómenos individuales*, fenómenos que *sólo pueden preverse estadísticamente*, se ha de admitir que “no es posible hacer una separación rigurosa entre un comportamiento independiente de los objetos y su interacción con los instrumentos de medida que definen el sistema de referencia”¹⁴. Por tanto, se ha de reconocer que es imposible subdividir los fenómenos atómicos y que el uso de los instrumentos de medida obliga a elegir entre los diferentes tipos de fenómenos complementarios que nos proponemos observar: en este caso, entre la localización puntual del fotón en la placa fotográfica y el fenómeno de interferencias que se produce al interponer espejos en su trayectoria de propagación. De modo que la ambigüedad sólo aparece cuando asignamos cualidades físicas ordinarias a los objetos atómicos; esto es, cuando concedemos un carácter objetivo, en sentido clásico, independiente de la observación, a dichos objetos. Por todo esto, Bohr concluye su refutación a la objeción de Einstein como sigue:

“En particular, ha de comprenderse que además de la determinación en cuanto a espacio y tiempo de los instrumentos que forman el dispositivo experimental, todo uso inequívoco de los conceptos de espacio y tiempo

¹³ *Ibid*, p. 62.

¹⁴ *Ibid*, p. 64.

se reduce, en la descripción de los fenómenos atómicos, al registro de observaciones relativas a impactos sobre una placa fotográfica o a efectos análogos de amplificación prácticamente irreversibles, tales como la condensación de una gota de agua alrededor de un ion en una cámara de niebla. Aunque, evidentemente, la existencia del cuanto de acción es en último término responsable de las propiedades materiales con los que se han construido los instrumentos de medida y de los que depende el funcionamiento de los dispositivos de registro, esta circunstancia no desempeña papel alguno en el problema de saber si la descripción por medio de la mecánica es adecuada y completa, al menos en los aspectos discutidos aquí¹⁵.

Einstein y Bohr retomaron sus discusiones tres años después, durante la Conferencia Solvay de 1930. En la reunión anterior habían concluido que no era posible ningún control sobre el intercambio de cantidad de movimiento y de energía entre los objetos y los instrumentos de medida si éstos han sido utilizados para definir el sistema de referencia de los fenómenos en el espacio y tiempo, es decir, si han sido utilizados para definir en términos clásicos las condiciones bajo las cuales aparece el fenómeno; pero, cuando se hace esto¹⁶, hemos de recordar que es esencial tener en cuenta todo el dispositivo experimental¹⁷.

Ahora las objeciones de Einstein cambiarán de rumbo y dirigirá su ataque hacia este punto de partida. Intentará demostrar que aquel control sería posible si se tuvieran en cuenta las exigencias y condiciones físicas de la teoría de la relatividad: en primer lugar, se podría medir la energía total de cualquier sistema usando la relación entre masa y energía, $E=mc^2$, y, después, con este dato podríamos determinar la cantidad de energía que el objeto atómico le transfiere durante la interacción. Con este propósito ideó el experimento del “fotón en la caja”.

Dicho experimento se compone de una caja con un orificio, que se puede abrir o cerrar gracias a un dispositivo de relojería en el interior de ésta. Se pesa la caja entera, cuando contiene cierta cantidad de radiación, y

¹⁵ *Ibid*, p. 63.

¹⁶ Es decir, cuando se especifican “las condiciones en que la aplicación del formalismo queda bien definida”. *Ibid*, p. 62.

¹⁷ Porque si no, los resultados de lo que consideraríamos el mismo fenómeno, serían diferentes y hasta contradictorios: “En efecto, la introducción en el aparato de cualquier pieza adicional, tal como un espejo, en la trayectoria de la partícula acarrearía nuevos efectos interferenciales que modificarían notablemente las predicciones en cuanto a los resultados finalmente registrados”. *Ibid*, p. 62.

después se deja escapar un fotón por el orificio abierto¹⁸ en un instante conocido con toda precisión, gracias al reloj; si ahora pesamos la caja, después de la emisión del fotón, podríamos conocer la energía del fotón con toda exactitud. De esta manera, Einstein pretendía sorprender a la mecánica cuántica en flagrante contradicción formal, ya que el conocimiento exacto de la energía y el tiempo de una partícula contradice el principio de indeterminación de las magnitudes de tiempo y energía.

Sin embargo, Bohr puso de relieve que era preciso modificar las condiciones de este experimento ideal, porque había que tener en cuenta las consecuencias de la identificación de la masa inerte con la masa gravitatoria, que implica la fórmula $E=mc^2$; esto es, “la relación entre el ritmo de marcha de un reloj y su posición en un campo gravitatorio, relación que es bien conocida por el desplazamiento hacia el rojo de las rayas del espectro solar, y que se deduce del principio de equivalencia de Einstein entre los efectos gravitatorios y los fenómenos observados en los sistemas de referencia acelerados”¹⁹. Con este fin se incorporó el dispositivo de la caja entera a una balanza de resorte, desde la que quedaba suspendida, y que podía medirse su posición gracias a un índice en la caja y a una escala fija al soporte de la balanza.

Una vez hecho esto, un examen detallado del experimento, y ahora con argumentos relativistas, éstos mostraron, de nuevo, que no es posible determinar el instante de emisión del fotón si el aparato está construido para medir con precisión la energía de éste, subrayando, así, “la necesidad de distinguir entre los instrumentos de medida propiamente dichos, que sirven para definir el sistema de referencia, y las partes de los aparatos que han de considerarse como objetos sujetos a investigación y para los cuales no pueden despreciarse los efectos cuánticos”²⁰. El razonamiento, en palabras de Bohr, fue como sigue:

“El punto esencial es ahora que toda determinación de esta posición con una precisión dada Δq entraña una incertidumbre mínima Δp en la medida de la cantidad de movimiento de la caja, ligada a Δq por la relación (3), $\Delta q \cdot \Delta p \approx h$. Esta incertidumbre ha de ser evidentemente inferior al impulso total que durante todo el tiempo T de la pesada puede

¹⁸ Abierto durante un período de tiempo muy corto para asegurarnos que sólo se ha emitido un fotón.

¹⁹ BOHR, N., *Discusión con Einstein sobre problemas epistemológicos de la física cuántica* (1949), p. 66. En: Física atómica y conocimiento humano.

²⁰ *Ibid*, p. 68.

comunicarse a un cuerpo de masa Δm por el campo gravitatorio, o sea (6) $\Delta p \approx h/\Delta q < T \cdot g \cdot \Delta m$, siendo g la aceleración de la gravedad. Cuanto mayor es la precisión de la lectura q de la posición del índice, más prolongado ha de ser el tiempo T de la pesada, si ha de obtenerse una precisión dada Δm en el peso de la caja y de su contenido.

Ahora bien: de acuerdo con la teoría general de la relatividad, un reloj, desplazado Δq en la dirección de la fuerza gravitatoria, cambia de ritmo de tal modo que su lectura en el transcurso de un intervalo de tiempo T difiere de este en una cantidad ΔT dada por la relación (7) $\Delta T/T = 1/c^2 g \Delta q$. Comparando (6) y (7) vemos que después de la pesada habrá en nuestro conocimiento del tiempo una incertidumbre: $\Delta T > h/c^2 \Delta m$. Junto con la fórmula (5), $E=mc^2$, esta relación conduce de nuevo a $\Delta T \cdot \Delta E > h$, de acuerdo con el principio de indeterminación”²¹.

Esta demostración teórica de Bohr no probó la veracidad de la mecánica cuántica, ya que su refutación a la objeción de Einstein supone la relación de incertidumbre entre p y q ²²; pero, sí demostró que no había ningún desacuerdo entre las consecuencias del formalismo matemático de la mecánica cuántica y la experiencia, como tampoco que sus predicciones se quedaran cortas ante las posibilidades de la observación. Éstos son los dos únicos medios que existen para probar que “un formalismo matemático lógicamente consecuente sea inadecuado” -y, sin embargo, según Bohr- “el razonamiento de Einstein no servía para ninguno de estos propósitos”²³. Einstein lo intentó una vez más con una tercera versión de este experimento del *fotón en la caja* y el dispositivo de balanza²⁴, pero, en general, sólo

²¹ *Ibid.*, pp. 67-68.

²² “Bohr refutaba el argumento y restablecía, para el caso considerado, la validez de las relaciones de Heisenberg de la forma siguiente: hay que tener en cuenta: 1. la incertidumbre Δp en la medida de la cantidad de movimiento de la caja; esta incertidumbre es ciertamente inferior al aumento de la misma magnitud debido a la entrada del fotón: ahora bien, esta incertidumbre tiene una incidencia sobre la precisión Δq en la medida de la variación del peso de la caja; 2. el efecto, previsto por la relatividad general, sobre la marcha del reloj y la variación Δt que de ello resulta sobre el instante del suceso; esta variación depende de la variación del potencial gravitatorio, a su vez ligada a Δq . Ahora bien, si asociamos algebraicamente las fórmulas que corresponden a las condiciones indicadas, volvemos a encontrar la cuarta relación de Heisenberg”. MERLEAU-PONTY, J., Albert Einstein. Vida, obra y filosofía, p. 183.

²³ BOHR, N., *Discusión con Einstein sobre problemas epistemológicos de la física cuántica* (1949), p. 70. En: Física atómica y conocimiento humano.

²⁴ Cf. EINSTEIN, A. (Oeuvres Choiesies I), Quanta. Mécanique statistique et physique quantique, pp. 218-223.

sirvió para evidenciar de nuevo la necesidad de considerar todo el dispositivo experimental a la hora de describir un fenómeno.

Lo más destacable de estos experimentos mentales es que Einstein intentaba por medio de ellos eliminar las relaciones de indeterminación y, de esta forma, probar que la mecánica cuántica estaba a medio camino en su desarrollo matemático. Era en este sentido en el que la había considerado incompleta durante esta etapa; pero, cuando Bohr le demostró que no era así, puesto que *las predicciones de la teoría cuántica agotaban todas las posibilidades de la observación y que la experiencia se ajustaba perfectamente a las consecuencias del formalismo matemático de aquella*, Einstein se dio por vencido en este aspecto y la consideró una teoría matemáticamente acabada y, por tanto, “consistente”, reservándose el término “completa” para aquella teoría que respetara, además, otras condiciones, esta vez, de tipo epistemológico.

Sin embargo, aquello que Einstein ya ha reconocido es que esta teoría es todo lo completa que una teoría estadística *del tipo clásico* puede ser y que no se la puede llevar más allá de dónde ella ha llegado, puesto que, *dentro de los límites de las relaciones de Heisenberg*, es una teoría acabada matemáticamente. Sin embargo, se propondrá demostrar que, precisamente, su carácter estadístico la convierte en una teoría fenomenista y superficial y que es posible llegar a explicar los fenómenos cuánticos desde otra teoría más general, cuyo objetivo sea *describir y representar clásicamente* una realidad más profunda, el mundo subcuántico, poblado de parámetros ocultos, capaces de restablecer un cierto modelo de descripción y de realidad, con el objetivo de acabar, así, con el indeterminismo del principio de Heisenberg.

Con tal fin escribió el artículo junto con Podolsky y Rosen, en el cual estos autores tendrán que cumplir dos objetivos: el primero, probar que la mecánica cuántica es una teoría incompleta; el segundo, que una “nueva teoría cuántica”²⁵ más completa, esto es, que respete las condiciones, del

²⁵ Digo “nueva teoría cuántica” porque aún no se trata de una teoría estrictamente nueva, en el sentido de ser totalmente distinta de la física cuántica; esto no lo intentará hasta que decida incluir el ámbito físico de los microfenómenos (los constituyentes de la materia) dentro de una teoría de campo unitario, basada en la continuidad y desterrando el cuanto de acción, como principio básico de la realidad. En estos momentos, él pretende versionar esta teoría y construir otra a partir de los fundamentos cuánticos. Esto se aprecia, claramente, en el experimento ideal, donde propone su incompletud a partir de una interpolación del principio de separabilidad espacial de los sistemas físicos a la ecuación de Schrödinger. Einstein realmente no volcará su genio en una teoría totalmente nueva hasta que no reinicie sus trabajos en la teoría del campo unitario, tras la respuesta de Bohr al artículo EPR, donde

tipo clásico, de descripción física sobre el mundo atómico, es factible. En realidad, demostrarán lo primero a partir de esto último:

“Sin duda, el fracaso de toda refutación formal de este tipo llevó a Einstein a fundamentar más profundamente su hostilidad de principio no hacia la mecánica cuántica sino hacia la hipótesis filosófica según la cual sería vano imaginar e intentar construir una teoría lógicamente más satisfactoria. La búsqueda de tal fundamento es lo que suscitó la preparación del artículo EPR”²⁶.

A continuación, expondré que el objetivo fundamental del argumento EPR no cambió respecto del que persiguió en los experimentos ideales. Se trata de restaurar el ideal clásico de descripción: la representación espacio-temporal, la descripción objetiva y la descripción causal-determinista. Pero, al igual que los experimentos ideales de las Conferencias Solvay, que cumplieron un papel muy importante en el desarrollo de la mecánica cuántica, el argumento EPR también servirá para revelar un nuevo aspecto de la realidad cuántica: la inseparabilidad espacial. Ésta es la base sobre la que se levanta la crítica de Einstein y ella también será la que eche por tierra su argumentación; pero esto último no ocurrirá hasta treinta años después de la muerte de Einstein. Por lo tanto, su creencia en este principio no sólo estaba bien fundada en aquella época, sino que, además, era la base que sustentaba su exigencia acerca de una realidad objetiva (en el espacio y el tiempo) y, perfectamente, descrita por la teoría a través de leyes deterministas.

b) El artículo EPR: 1935

Einstein no estaba dispuesto a aceptar las implicaciones de la mecánica cuántica, que durante las Conferencias Solvay salieron a la luz: abandono de la descripción causal en el espacio y en el tiempo (determinismo físico), a causa del carácter de exclusión mutua de las condiciones experimentales; renuncia a la representación espacio-temporal de los fenómenos atómicos, debido a lo anterior y unido a la imposible subdivisión de aquéllos (es decir, a la inseparabilidad del objeto y del

aquéel le demuestra que la ecuación de ondas implica, precisamente, la violación de tal principio; pero no entraré en esto hasta más adelante.

²⁶ MERLEAU-PONTY, J., Albert Einstein. Vida, obra y filosofía, p. 184.

instrumento que lo mide), y su consiguiente renuncia a la descripción clásicamente objetiva, donde los sistemas físicos eran descritos al margen del dispositivo experimental, preparado para medirlos.

Cuando Einstein publicó este artículo, junto a Podolsky y Rosen²⁷, en su ánimo estaba el rebatir todas estas consecuencias que la nueva teoría atómica arrojaba sobre la naturaleza de la descripción física.

Un resumen del argumento sobre el que EPR plantea todas sus objeciones hacia la física cuántica es dado por los propios autores al principio del artículo y dice así:

“En una teoría completa hay un elemento correspondiente a cada elemento de realidad. Una condición suficiente para que una magnitud física sea real es la posibilidad de predecirla con certeza, sin perturbar el sistema. En mecánica cuántica, en el caso de dos magnitudes físicas descritas por operadores no-conmutativos, el conocimiento de una excluye el conocimiento de la otra. Entonces, o bien (1) la descripción de la realidad dada por la función de onda en mecánica cuántica no es completa o bien (2) esas dos magnitudes no pueden tener realidad simultánea. El examen del problema de hacer predicciones relativas a un sistema sobre la base de mediciones hechas sobre otro sistema con el que previamente ha interactuado permite concluir que si (1) es falso, entonces (2) también lo es. Así, uno puede concluir que la descripción de la realidad dada por la función de onda no es completa”²⁸.

Con el fin de llevar a cabo esta demostración, los tres físicos estructuran su artículo en dos partes. En la primera exponen la, así denominada por ellos, “condición de completud” para toda teoría física, con la que se decide si una teoría es completa o no, y el “criterio ontológico”, que determina la realidad de las magnitudes físicas o elementos de la teoría. En virtud de esto pretenderán probar la validez del dilema sobre el que se levanta toda la construcción argumentativa de su crítica a la mecánica cuántica. Para ello tendrán que especificar qué es lo

²⁷ La contribución de cada uno de ellos al artículo la describe Jammer de la siguiente forma: “To fully understand the situation it is useful to distinguish between the following three components of the paper: (1) the general conceptual background and the physical scenario, (2) the thought-experiment involving the two partial systems and its mathematical elaboration, and (3) the printed version of the paper as published in *The Physical Review*. The first component must be attributed to Einstein, the second to Rosen, and the third to Podolsky”. JAMMER, M., The Conceptual Development of Quantum Mechanics, pp. 412-413.

²⁸ EPR, p. 777.

que entienden por *completud* y por *realidad física*, ya que Einstein tuvo que admitir, tras las Conferencias Solvay, que la física cuántica era completa, pero lo era, únicamente, dentro de los límites de las relaciones de indeterminación²⁹. Ahora, han de definir aquellos conceptos de tal forma que transgredan tales límites.

El criterio ontológico dice así: «*Si, sin perturbar el sistema de forma alguna, podemos predecir con certeza (es decir, con una probabilidad igual a la unidad) el valor de una magnitud física, entonces allí existe un elemento de la realidad física que se corresponde con la magnitud física*»³⁰. En cuanto que la condición necesaria para que una teoría sea completa es que: «*cada elemento de la realidad física debe tener su contrapartida en la teoría física*»³¹.

Por tanto, si aceptamos atenernos a este criterio de realidad y a la condición de completud, nos encontramos con el anterior dilema: «*o bien (1) la descripción mecánico-cuántica de la realidad dada por la función de onda no es completa o bien (2) cuando los operadores correspondientes a dos magnitudes físicas no conmutan ninguna de ellas dos puede tener realidad simultánea*»³². Los autores opinan que esta disyunción es válida porque si afirmamos la completud de la mecánica cuántica no podemos, al mismo tiempo, afirmar que los operadores no-conmutativos tengan realidad simultánea, ya que esto implicaría que la realidad depende del proceso de medida, puesto que el valor de dichos operadores se ve afectado por el acto de la observación y, por tanto, según las condiciones cuánticas, que dos sistemas físicos no son independientes ni tan siquiera a pesar de estar aislados espacialmente uno del otro.

Tal condición sobre la completud de una teoría y el criterio para decidir sobre la realidad de los elementos teóricos constituyen la base del argumento principal, ya que, dado este criterio y su condición, podrán probar, en esta primera parte del artículo, que la disyunción del dilema que

²⁹ “This theory is until now the only one which unites the corpuscular and ondulatory dual character of matter in a logically satisfactory fashion; and the (testable) relations which are contained in it, are, within the natural limits fixed by the indeterminacy-relations, complete”. EINSTEIN, A., *Reply to criticisms*. In: P.A. SCHILPP (ed.), Albert Einstein. Philosopher-Scientist, vol. 2, pp. 666-667.

³⁰ EPR, p. 777.

³¹ *Ibid.*

³² *Ibid.*, p. 778. Como el experimento de la segunda parte se dirigirá a probar que (2) es falso para afirmar la proposición (1), al final se podrá sentenciar que la mecánica cuántica no es una teoría completa.

plantean es ineludible y desde el cual queda establecido que si una teoría es completa, todos sus elementos se han de corresponder con la realidad, es decir, han de tener realidad simultánea, y, por tanto, según el criterio ontológico, valores bien definidos. No obstante, como mostraré en otro lugar, esta correlación, entre el criterio ontológico y la condición de completud, sólo tiene sentido partiendo del postulado de localidad como un principio físico universal, con validez absoluta e indubitable. La razón de esto es que tal postulado permite asumir, bajo las condiciones del experimento ideal que plantean, que sus valores son predecibles sin perturbar el sistema.

Éste es el único aspecto de la física cuántica sobre el que se discutirá aquí, ya que el éxito de una teoría, tal y como el propio Einstein deja constancia al principio del artículo, depende tanto de si la teoría es correcta como de si es completa. Tal y como ya expuse, después de sus discusiones con Bohr durante los Congresos Solvay, Einstein ya no pone en duda el éxito empírico de la física cuántica, es decir, la considera una teoría lógicamente consistente y correcta, en el sentido de que hay acuerdo entre las conclusiones de la teoría y el resultado de los experimentos³³. En cambio, no la puede considerar una teoría completa porque no es capaz de “describir físicamente la realidad”, debido a la presencia del principio de Heisenberg, pues la lectura que en EPR se extrae del hecho de que dos operadores no conmuten ($AB \neq BA$) es la siguiente: “cuando el momento de una partícula es conocido, su coordenada no tiene realidad física”³⁴, ya que, en función del criterio ontológico, no tiene un valor definido.

Por tanto, la mecánica cuántica no es una teoría completa, dado que, en una teoría completa, por un lado, todos los elementos de la teoría deben tener su contrapartida en la realidad³⁵ y poseer valores bien definidos para que podamos considerarlos reales³⁶ y, por otro lado, tener realidad

³³ Adviértase que Einstein tuvo que admitir esto muy a pesar suyo y presionado por la refutación de sus argumentos por parte de Bohr, de modo que la situación había quedado así: la mecánica cuántica es una teoría correcta porque existe acuerdo entre sus conclusiones y los resultados de los experimentos (Cf. EINSTEIN, A., “EPR”, p. 777) y es consistente porque no sufre de ninguna contradicción lógica en su estructura matemática (Cf. EINSTEIN, A., Mis Ideas y Opiniones, p. 287).

³⁴ Es decir, que “... any attempt to determine the latter experimentally will alter the state of the system in such a way as to destroy the knowledge of the first”. EPR, p. 778.

³⁵ A excepción, naturalmente, de los elementos ideales que toda teoría incorpora con el fin de servir como instrumentos auxiliares sin realidad física.

simultánea porque todos los elementos de la realidad han de tener una existencia continua³⁷.

En la segunda parte del artículo se expone el experimento ideal donde aparece el caso crítico, o caso límite, que falsa la tesis sobre la completud de la mecánica cuántica: los autores afirman que existe un caso, aún no contemplado por los defensores de la nueva teoría y que ellos expondrán a continuación, en el que la mecánica cuántica se contradice, ya que, aun partiendo de los principios matemáticos de ella misma, nos encontramos con que se ha de afirmar que los operadores no-conmutativos tienen realidad simultánea (valores bien definidos); hecho que contradice la no-conmutatividad del principio de Heisenberg.

Con este experimento se propone demostrar que la afirmación, que se hace en la actual teoría atómica, acerca de la completud de la función de onda a la hora de ofrecer una descripción “de la realidad física del sistema en el estado correspondiente -a esta función de onda-”, “junto con el criterio de realidad dado arriba, lleva a una contradicción”: aceptar la completud de la física cuántica, y con ello que los operadores no-conmutativos tengan realidad simultánea, supone la violación de este criterio, puesto que nos veríamos obligados a afirmar que los sistemas físicos no son independientes a pesar de estar espacialmente separados, ya que los elementos correspondientes a operadores no-conmutativos tienen realidad simultánea aunque no definida. Así, Einstein concluirá que no puede considerarse una teoría completa³⁸.

³⁶ “Corresponding to each physically observable quantity A there is an operator, which may be designated by the same letter. If ψ is an eigenfunction of the operator A , that is, if (1) $\psi' \equiv A\psi = a\psi$, where a is a number, then the physical quantity A has with certainty the value a whenever the particle is in the state given by ψ . In accordance with our criterion of reality, for a particle in the state given by ψ for which Eq.(1) holds, here is an element of physical reality corresponding to the physical quantity A ”. EPR, p. 778.

³⁷ “From this follows that either (1) *the quantum-mechanical description of reality given by the wave function is not complete* or (2) *when the operators corresponding to two quantities do not commute the two quantities cannot have simultaneous reality*. For if both of them had simultaneous reality -and thus definite values- these values would enter into the complete description, according to the condition of completeness. If then the wave function provided such a complete description of reality, it would contain these values; these would then be predictable. This not being the case, we are left with the alternatives states”. *Ibid.*

³⁸ Más adelante buscará una teoría que sí mantenga este principio, razón por la cual Einstein aboga por una teoría física futura de este tipo: una teoría de campo. “La théorie du champ a poussé ce principe à l'extrême en localisant dans les éléments de l'espace infiniment petits (en quatre dimensions) les objets élémentaires, existant indépendamment l'un de l'autre, qui en sont le fondement, ainsi que les lois élémentaires élaborées pour eux”.

Para demostrar esto, el nuevo experimento ideal tendrá que referirse a dos sistemas físicos, en lugar del único sistema del que trataban los anteriores, o, por decirlo de otra manera, se habrá de referir a un sistema pero doble, esto es, formado por dos elementos, o sistemas parciales, espacialmente separados después de haber interactuado entre sí durante un intervalo de tiempo de 0 a T ³⁹.

Rosen elabora la parte matemática de este artículo que, básicamente, consiste en lo siguiente: conocemos los estados de los dos sistemas parciales antes de la interacción, antes de $t=0$, y, si los dos sistemas, I y II, han interactuado, podemos calcular, gracias a la ecuación de Schrödinger, el estado combinado de ambos sistemas en cualquier instante posterior a T ; este estado total viene descrito por la función de onda ψ . Sin embargo, la ecuación de Schrödinger nada nos puede decir acerca del estado de ninguno de los dos sistemas por separado después de la interacción. Esta información sólo la podemos obtener con una nueva medida, pero esta medición provocará el *colapso de ψ* ⁴⁰, tras lo cual aparece una nueva función de onda, o también llamada “función de estado”, que nada tiene que ver con la anterior. Por ello y de acuerdo con la mecánica cuántica, al medir una magnitud correspondiente a un operador no-conmutativo, destruiremos las posibilidades de conocer el valor de su correspondiente par, canónicamente conjugado. Ahora bien, esta medida sólo puede afectar a uno de los dos sistemas, ya que, en el momento de la medición ya están espacialmente separados, así pues, el colapso de ψ sólo se producirá en el sistema I, sobre el que hemos efectuado la medición. La función de onda que describe el estado total de los dos sistemas permanecerá intacta respecto al otro sistema que no ha sido perturbado por la medida, a la vez que habremos determinado el valor correspondiente a la magnitud medida en el primer sistema.

EINSTEIN/BORN, Correspondance 1916-1955, carta 88 de Einstein, fechada el 5 de abril de 1948, p. 186. Pero, de momento, dejaré esta cuestión de lado, para abordarla más tarde.

³⁹ Einstein admitió, tras las Conferencias Solvay, que no podemos escapar del principio de Heisenberg cuando tratamos con una sola partícula. Sin embargo, pensó que la situación sería distinta si consideramos dos sistemas aislados en lugar de uno, pues, si están espacialmente separados, no puede haber ningún tipo de correlación entre ellos. No obstante, más tarde se reveló que esta prohibición no es más que un supuesto tácito en la argumentación de Einstein, ya que se trata de un principio físico que entra en contradicción con los principios de la mecánica cuántica.

⁴⁰ Recuérdese que también tiene otras denominaciones, como *reducción del paquete de ondas* o *del vector de estado*.

Si ahora volvemos sobre el sistema II, representado por la función de onda que no ha colapsado, y medimos la otra magnitud, obtenemos el valor que faltaba para ambos sistemas, con lo cual se dispone de dos funciones de onda diferentes, que es el punto decisivo en este experimento porque si son dos, entonces las podemos asignar a diferentes operadores no-conmutativos⁴¹: el hecho de conseguir, o no, estas dos funciones es la clave del experimento, ya que cada una contiene la información sobre la magnitud de la que carece la otra y ambas se pueden asignar al mismo sistema después de la interacción⁴².

En conclusión, como al medir una magnitud del sistema I no hemos perturbado el valor de su par en el sistema II, por estar separados en el momento de la observación, y, dado que, como habían interactuado, podemos conocer el estado posterior de ambos sistemas conjuntamente, por estar descritos por la misma función de onda (inicial), tenemos que, con mediciones diferentes sobre los dos sistemas independientes, hemos obtenido de forma simultánea el valor de ambas magnitudes canónicamente conjugadas y sin perturbar el sistema al que pertenece, por lo tanto, en virtud del criterio ontológico, son magnitudes reales⁴³.

⁴¹ “Now, it may happen that the two wave functions, ψ_k and ϕ_r , are eigenfunctions of two non-commuting operators corresponding to some physical quantities P and Q , respectively”. EPR, p. 779.

⁴² “We see therefore that, as a consequence of two different measurements performed upon the first system, the second system may be left in states with two different wave functions. On the other hand, since at the time of measurement the two systems no longer interact, no real change can take place in the second system in consequence of anything that may be done to the first system. This is, of course, merely a statement of what is meant by the absence of an interaction between the two systems. Thus, *it is possible to assign two different wave functions* (in our example ψ_k and ϕ_r) *to the same reality* (the second system after the interaction with the first)”. EPR, p. 779. Esta misma afirmación volvemos a encontrarla en una carta que escribió a Ernst Cassirer el 16 de marzo de 1937: “Cependant, le résultat obtenu pour ψ_2 étant complètement différentes l’une de l’autre qui correspondent *au même état physique* de 2. Or ceci est incompatible avec la conception selon laquelle ψ_2 serait une description complète de l’état physique du point 2; car une description *complète* supposerait nécessairement que ψ_2 soit assigné de façon *univoque* à l’état physique du point 2”. EINSTEIN, A., Quanta. Mécanique statistique et physique quantique, p. 241.

⁴³ “Thus, by measuring either A or B we are in position to predict with certainty, and without in any way disturbing the second system, either the value of the quantity P (that is p_k) or the value of the quantity Q (that is q_r). In accordance with our criterion of reality, in the first case we must consider the quantity P as being an element of reality, in the second case the quantity Q is an element of reality. But, as we have seen, both wave functions ψ_k and ϕ_r belong to the same reality”. EPR, p. 780.

Los autores llevan este resultado del experimento ideal al dilema de la página 778 para deducir de ello que la mecánica cuántica es incompleta porque el experimento ha demostrado que podríamos obtener al mismo tiempo los valores exactos de las magnitudes no-conmutativas y, por tanto, que tienen realidad simultánea⁴⁴, de ahí que *se pueda imaginar* una teoría realmente completa que sustituya a la actual forma estadística de la mecánica cuántica para ofrecernos una descripción de esa realidad⁴⁵.

Este breve artículo ha motivado desde su publicación innumerables estudios y miles de páginas se han dedicado a él. La razón de ello es que pone sobre el tapete una cuestión profundamente filosófica: la realidad del mundo y nuestro conocimiento de ella; es decir, ¿es la realidad independiente del sujeto que la somete a observación? ¿Cuáles son los requisitos que ha de cumplir la descripción física de aquélla? ¿Es, en último término, esta realidad representable en el espacio y en el tiempo?

A continuación se podrá comprobar que la postura que mantuvo Einstein se mantiene confinada, desde un punto de vista general, dentro de los límites que impuso el realismo científico del ideal clásico de descripción: la descripción espacio-temporal (representabilidad espacial), la descripción clásicamente objetiva (independiente del observador) y el determinismo (predictibilidad causal). Pero, tal y como ya se argumentó en el primer capítulo, este ideal descriptivo supone la aceptación de una serie de postulados, que el análisis de Bohr nos reveló arbitrarios. Ahora bien, merece la pena detenerse en estas objeciones, que plantea Einstein, por cuatro motivos: primeramente, porque nadie como él puso de relieve los problemas y los inconvenientes que supone la renuncia a aquel ideal de descripción; en segundo lugar, porque, si bien aquellos postulados resultaron ser arbitrarios, no lo es el objetivo que con ellos cumplía la física, esto es, explicar la realidad y ofrecer una *descripción física o*

⁴⁴ “Previously we proved that either (1) the quantum-mechanical description of reality given by the wave function is not complete or (2) when the operators corresponding to two physical quantities do not commute the two quantities cannot have simultaneous reality. Starting then with the assumption that the wave function does give a complete description of the physical reality, we arrived at the conclusion that two physical quantities, with noncommuting operators, can have simultaneous reality. Thus the negation of (1) leads to the negation of the only other alternative (2). We are thus forced to conclude that the quantum-mechanical description of physical reality given by wave functions is not complete”. *Ibid.*

⁴⁵ “While we have thus shown that the wave function does not provide a complete description of the physical reality, we left open the question of whether or not such a description exists. We believe, however, that such a theory is possible”. *Ibid.*

intuitiva de ésta, que, según Einstein, no se puede restablecer, a no ser desde la reconstrucción que él mismo hace de tales pilares clásicos⁴⁶; una tercera razón es que Einstein no comparte del todo el ideal clásico, hace una matización con respecto al tipo de descripción espacial que maneja la “representación pictórica”, ya que no defenderá esta última, esto es, los modelos pictóricos, pero sí la primera, la espacialidad.

Por último, el análisis de Einstein, además, reveló que existía un principio físico fundamental e “indubitable”, la separabilidad espacial, bien fundado teóricamente y avalado por todas las experiencias físicas (fuera del ámbito de la mecánica cuántica), el cual servía de soporte a los postulados clásicos, la mayoría de ellos fundamentales para Einstein; de forma que, si negamos éstos, hemos de negar aquel otro, que constituye el sustrato más profundo y el suelo más firme de todas las ciencias físicas. En su momento, demostraré que esto constituyó la base de su crítica.

c) La descripción física, bajo el criterio de realidad

Es fácil interpretar la Polémica Einstein-Bohr, hay autores como Arthur Fine que así lo hacen, como un debate entre realismo y fenomenismo, sobre todo, si no tenemos en cuenta la insistencia de Bohr en rechazar la etiqueta fenomenista para su filosofía de la complementariedad. Por ello, esta caracterización es, como mínimo, injusta. Ahora bien, es cierto que Einstein enfoca su polémica con Bohr desde dicha dicotomía⁴⁷ porque él parte de un principio ontológico, al que en EPR se le identifica como “criterio de realidad”, que opone al principio epistemológico de Bohr, esto es, su doctrina del “actor-espectador”, entendida por Einstein como una tesis estrictamente fenomenista.

A partir de ahora, expondré este enfoque, parcial, de Einstein; seguiré sus argumentos y, al final del recorrido, se podrá comprobar que la exigencia de éste, acerca de cómo ha de ser el tipo de descripción, que tracemos de la realidad, lleva implícita el postulado de localidad como

⁴⁶ Este programa de Einstein, será analizado en el apartado 5.3.

⁴⁷ Aunque, el motivo de esto no fue una interpretación errónea de la complementariedad por parte de Einstein, sino, más bien, porque no creyó en la solución de Bohr: para aquél, la postura del físico danés estaba injustificada, carecía de todo fundamento.

requisito para la intuición y la descripción física y se juzgará si este postulado es válido para servir de criterio de realidad⁴⁸.

El ataque del artículo Einstein hacia la descripción mecánico-cuántica se lanza desde dos frentes: el primero es que tal descripción contradice el criterio de realidad, que en el artículo EPR se está manejando, lo cual le permite establecer el dilema de la página 778, con el que se prepara el terreno para que el resultado de su experimento ideal sea concluyente⁴⁹; en cuanto al segundo, a modo de refuerzo del primero, es el postulado de localidad, pues, aun considerando que la descripción de la función de onda fuera completa, la propiedad que tiene todo sistema, separado espacialmente, de no interferir con otro desmentiría la afirmación anterior.

Ahora me detendré en aquel primer frente del ataque. Según éste, una teoría es “completa” sólo cuando ésta ofrece una *descripción directa* de la realidad; sin embargo, esta exigencia supone una determinada concepción sobre la realidad física que se corresponde con la concepción clásica en los siguientes puntos: una representación espacio-temporal, una descripción objetiva (independiente) y una predictibilidad causal (leyes deterministas).

Tales rasgos de la descripción clásica tienen algo en común: todos ellos dependen de la *noción de realidad* que propone Einstein, según la

⁴⁸ Más adelante profundizaré en esto; de momento, sólo adelantaré que este requisito, en la actualidad, está puesto en tela de juicio, por tanto, le deja incapacitado para constituir un criterio de realidad, desde el que juzgar la completud de la física cuántica.

⁴⁹ Se ha de recordar que, ciertamente, el artículo no fue redactado por Einstein sino por Podolsky, ya que dicho artículo, para la revista norteamericana *Physical Review*, se escribió en inglés, idioma con el que Einstein tenía algunos problemas, como él mismo se lo confiesa a Schrödinger en una carta fechada el 19 de junio de 1935 (recogida en la recopilación: EINSTEIN, A.: *Quanta. Mécanique statistique et physique quantique*, p. 234-236). Esta carta también revela que Einstein no estaba del todo de acuerdo con el criterio de completud, que apareció en EPR; es más, ni siquiera leyó el borrador final antes de su publicación, así como, tampoco lo mencionó de nuevo en sus publicaciones posteriores, pues, aunque este criterio lógico no contradecía sus propias ideas sobre la completud de la física cuántica, sí oscurecía los motivos por los que Einstein la consideraba incompleta, ya que éstos eran de otra índole, como ya demostraremos más tarde. Además, tampoco le satisfizo la redacción de Podolsky, centrada en este criterio y en un planteamiento lógico del problema. (Cf. JAMMER, M., *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, “Appendix C”, pp. 412-416.) Por esta razón, cuando me detenga en el análisis de la postura de Einstein, no seguiré el discurso lógico que apareció en EPR, sino, únicamente, desde el trasfondo filosófico que aportó Einstein al artículo. Ahora bien, de momento y hasta entrar en el apartado 5.3, seguiré cotejando algunas de sus ideas propias con las del artículo conjunto.

cual, aquélla se compone *de objetos autónomos perfectamente localizados en el espacio-tiempo*.

Toda postura que no respete estas condiciones será catalogada por Einstein de “fenomenista” (“observacionista”) e “instrumentalista”, “pragmatista” o “utilitarista” y “positivista-empirista” o “neopositivista”; razón por la cual, éste entendió su debate con Bohr como una polémica entre el “realismo”, que él mismo defendía, y el “fenomenismo absoluto” o “radical”, que le atribuyó a Bohr.

El motivo por el cual le dio este enfoque es el siguiente: ¿cuál es la exigencia, que aparece en EPR, para que una teoría pueda ser considerada completa? Aquello que se le exige es que todos sus elementos se correspondan con la realidad.

Ahora bien, ¿cómo podemos saber, según Einstein, si un elemento de la teoría, o magnitud física, tiene su correlato con la realidad? Sólo si podemos obtener el valor de la magnitud sin perturbar el sistema al que pertenece, lo cual nos permitiría predecirlo con certeza; hecho que Einstein atribuye a los elementos que contienen aspectos o características espacio-temporales.

Además, si algo tiene realidad ha de tenerla siempre y su existencia no puede depender del proceso de medida. Sin embargo, la realidad simultánea de los operadores no-conmutativos, que representan a las magnitudes canónicamente conjugadas, es una exigencia que viene impuesta por la concepción clásica de realidad física: esta realidad ha de ser perfectamente representable por la teoría e independiente del sujeto, por tanto, existe siempre al margen de cualquier medición que el experimentador efectúe sobre el objeto. No obstante, la descripción de la realidad dada por la función de onda no atribuye a los fenómenos atómicos aquel rango de “realidad física independiente”.

Ahora y siguiendo este nuevo hilo, vuelve de nuevo sobre sus objeciones, aunque, como ya advertí antes, cambiando el sentido de la crítica, y aquéllas se dirigieron a demostrar que la mecánica cuántica, aun tratándose de una teoría “correcta”, era una teoría provisional y destinada a ser superada por otra teoría cuántica sobre el mundo atómico más *completa*, en el sentido de que fuera *capaz de describir la realidad física de una manera autónoma*, sin tener que hacer referencia a los dispositivos experimentales, que la física cuántica incluye en nuestra descripción de la realidad, bajo una fórmula fenomenista que nos aleja del realismo descriptivo de la física.

Durante esta fase de 1935, Einstein aún aspiraba a encontrar una teoría cuántica *más general* que la mecánica ondulatoria o la matricial: a

perfeccionar y completar de algún modo la mecánica cuántica con otra teoría más amplia. Es decir, consideraba que su periodo de construcción todavía estaba en proceso pero en otro sentido, ya que, aun siendo empíricamente correcta y matemáticamente consistente y acabada (dentro de los límites de las relaciones de Heisenberg), era físicamente insatisfactoria, dado que no describía “directamente” la realidad objetiva en el espacio y en el tiempo; por tanto, se trataba de una teoría sin conexión con la realidad extralingüística, sin contenido físico y, por ello, incompleta: *inacabada*, fuera de los límites del indeterminismo, *fenomenista* e *instrumentalista*, alejada del ideal físico de descripción realista.

En concreto, Einstein perseguía la idea de una nueva versión de la teoría que surgiera de la manipulación del núcleo teórico de la actual: eliminar las relaciones de incertidumbre, pero conservando la validez del contexto experimental del cuanto de acción; esto es, las leyes empíricas conocidas hasta la fecha y los fenómenos descubiertos, que componen el dominio científico de aplicación de la física cuántica.

Sin embargo, Bohr defiende que es completa en todo su sentido porque, además, de conservar la conexión con el mundo real (tesis que sí es discutible): para él, el proceso de construcción de esta teoría ha llegado a su fin y no podemos añadir ni quitar ninguna base de principio sin destruir la teoría misma. Sólo más tarde, cuando Bohr le convenció de esto, Einstein abandonará esta búsqueda: la manera de cómo hacer más completa a la mecánica cuántica, modificándola de tal forma que se ajustase a los requisitos del ideal descriptivo que defiende y cambiando los aspectos de ésta que más insatisfacción le producían; dichos rasgos eran su carácter estadístico y las relaciones de indeterminación de Heisenberg, los cuales obedecían a la necesidad de incluir el dispositivo experimental en la descripción y en la información, que hemos obtenido del objeto bajo observación. En concreto, Bohr demostrará a Einstein que no podemos sustituir el cuanto de acción, responsable del peculiar tipo de descripción de la mecánica cuántica, por otro principio (y menos aún si está basado en la noción de campo continuo), sin construir una nueva teoría que nada tenga que ver con ésta. Lo mismo ocurriría si elimináramos de la teoría de la relatividad el postulado de la velocidad finita de la luz, la constante c .

Éste es el telón de fondo sobre el que se discute, en esta época, el carácter completo de la mecánica cuántica y no “la tesis del final-del-camino” sobre la que Popper interpreta la polémica Einstein-Bohr en la fase del artículo EPR⁵⁰.

⁵⁰ Cf. POPPER, K.R, Teoría cuántica y el cisma en Física, pp. 31-34.

Cuando algunos teóricos, como Heisenberg y Bohr, afirman que *la física ha llegado al fin del camino* no se refieren, como cree Popper, a que la mecánica cuántica sea *el final del camino de la física*, sino a que el proceso de construcción de la física cuántica, como una teoría más, ha concluido: la física cuántica es una teoría completa y acabada. Afirmer que nada más puede hacerse en el terreno de la física es, ciertamente, absurdo; aquellos físicos defendían que *nada más puede hacerse en el núcleo teórico de la física cuántica*.

Mostrar a Einstein este tipo de completud no estaba de más, en absoluto, ya que, tanto él como otros físicos, no sólo habían presenciado el nacimiento de la nueva teoría, sino que, además, habían contribuido a ello, de modo que para éstos no era tan evidente como puede parecer ahora el haber terminado esta tarea. Por otro lado, Bohr jamás negó la posibilidad de otras teorías futuras; todo lo contrario, su tesis de la revisión de los marcos conceptuales abre la puerta a nuevas ampliaciones de éstos, como ya señalé en el apartado acerca de “La unidad del conocimiento”. Sólo sostuvo que, dentro del estricto marco de los fenómenos cuánticos conocidos hasta la fecha, la física cuántica es la teoría definitiva que los describe y explica en su totalidad y completud. Nuevos fenómenos constituirían un nuevo dominio y podrían dar cabida al nacimiento de otra teoría que explicase éstos y los anteriores, sobre los que daba cuenta la mecánica cuántica, pero dicha teoría ya no sería un perfeccionamiento del núcleo teórico de la física cuántica; tendría el suyo propio.

Haré un paréntesis para recordar cómo es el tipo de información que la función de onda nos ofrece de la realidad⁵¹. Según la interpretación estadística de Max Born⁵², el *cuadrado del módulo de la función de onda* contiene *toda la información* sobre el sistema, pero, la contiene *en forma de probabilidades*; sólo cuando la onda se colapsa podemos saber el valor

⁵¹ Hubo y hay varias interpretaciones de la función de onda, como la interpretación de de Broglie de la “onda piloto”, la de Schrödinger o, posteriormente, la de Bohm. Pero, ninguna tan satisfactoria para la mayoría de los físicos, incluido Einstein, como la interpretación estadística que propuso Born. A este respecto, Einstein afirma lo siguiente, tras exponer un ejemplo de similares características a la paradoja del “gato de Schrödinger”: “Nous nous trouvons placés devant une alternative analogue lorsque nous voulons interpréter la relation qu’entretient la mécanique quantique avec la réalité. Pour le système que constitue la bille, bien évidemment, la deuxième interprétation, «spiritiste», à la Schrödinger, est pour tout dire inepte: seule la première interprétation, celle de Born, sera prise au sérieux par le contribuable”. EINSTEIN, A., *Carta a Schrödinger*, con fecha del 19 de junio de 1935, en: EINSTEIN, A., *Quanta. Mécanique statistique et physique quantique*, p. 235.

⁵² Cf. BORN, M., *Physics in my generation*, pp. 9-12.

definido de una de las magnitudes canónicamente conjugadas, pues, al mismo tiempo que nos ofrece este valor, destruye la posibilidad de hallar el correspondiente a su par⁵³. De esta forma, la información que contiene ψ no es una información acerca de la realidad, sino del conocimiento que tenemos de ésta.

En otras palabras, sólo contiene un conjunto de probabilidades que no alude a la realidad salvo estadísticamente: las ondas que contiene ψ no son materiales, sólo son medidas de probabilidad y como tales sólo indican la posibilidad, por ejemplo, de presencia de la partícula⁵⁴. Por ello, el colapso de ψ sólo se refiere a que hemos constatado que una de estas probabilidades se ha hecho efectiva: el conjunto de posibilidades se ha reducido a una sola solución. Sin esta interpretación “indirecta” del carácter estadístico de la función de onda, la superposición de estados, que implica la ecuación de Schrödinger, nos conduciría a paradojas del tipo “gato de Schrödinger”, las cuales nos llevarían a afirmar que la realidad no toma forma si antes no es observada.

La conocida paradoja del gato es otro experimento ideal imaginado esta vez por Schrödinger. El problema que plantea es que si se da una interpretación “realista” a la función de onda (que representa los campos ondulatorios), como hacen Schrödinger y de Broglie, nos encontramos con que la realidad no toma forma hasta que es observada y nunca antes. El experimento consiste en una caja opaca e insonora provista de una abertura a través de la cual sólo puede entrar un fotón; una vez dentro, el fotón se encuentra con un espejo semitransparente que divide su trayectoria en dos caminos: tanto puede dejar pasar al fotón como reflejarlo. El camino que

⁵³ Como ya desarrollé en el segundo capítulo de este trabajo, esta situación es completamente equivalente a la que representa el principio de Heisenberg: podemos hallar el valor aproximado (probable) de ambas magnitudes no-conmutativas, pero si nos decidimos por el valor definido o exacto de una de ellas, la incertidumbre de la otra aumenta infinitamente.

⁵⁴ “La dificultad parecía insuperable, hasta el momento en que fue solucionada por Born, con un método tan simple como inesperado. Los campos ondulatorios de de Broglie-Schrödinger no debían interpretarse como descripciones matemáticas de cómo se produce de verdad un hecho en el tiempo y en el espacio, aun cuando -por supuesto- tienen que ver con este hecho. En realidad, esos campos son una descripción matemática de lo que podemos realmente saber acerca del sistema, y sólo sirven para hacer afirmaciones estadísticas y predicciones de los resultados de todas las mediciones que podamos llevar a cabo sobre el sistema”. EINSTEIN, A., *Los fundamentos de la física teórica* (1940), en: *Mis Ideas y Opiniones*, p. 300. Éste es el punto débil de la mecánica cuántica que Einstein ataca, ya que una teoría completa ha de describir *cómo se produce de verdad un hecho en el tiempo y en el espacio*; esta idea la desarrollaré más adelante.

sigue el fotón reflejado es inofensivo, pero el otro lleva hasta un dispositivo electrónico que acciona cualquier mecanismo mortífero, por ejemplo, el disparador de un fusil que está apuntando a un gato. Pues bien, según Schrödinger, la mecánica cuántica se encuentra con la paradoja de los estados superpuestos acerca de un “gato vivo” y un “gato muerto”. Como no se sabe si el fotón ha atravesado el espejo o si ha sido reflejado, nos vemos obligados a decir que ha hecho ambas cosas “potencialmente” y, por tanto, que el gato está potencialmente vivo y muerto al mismo tiempo. Sólo al abrir la caja se producirá la reducción del “paquete de ondas”, es decir, se hará efectivo alguno de los dos estados del gato; pero, de esta manera, surge la paradoja al ser el observador el responsable de la muerte del gato, pues es el que ha construido la realidad con sólo mirar.

No obstante, esta paradoja sólo existe cuando asumimos que la información que contiene ψ es una información acerca de la realidad y no de nuestro conocimiento acerca de ella. Esta indeterminación del estado real del gato es consecuencia de la indeterminación de la trayectoria espacio-temporal del fotón y está directamente relacionada con el problema de la medida y con el fracaso de la descripción espacio-temporal, que expuse anteriormente, con lo cual el “problema del gato” se desvanece bajo la interpretación de Bohr, que fue avalada por la versión estadística de las ondas.

Uno se pregunta por qué Einstein se manifestó abiertamente a favor de esta interpretación (aunque no aplicada a sistemas individuales) si, al fin y al cabo, las conclusiones de Born están en consonancia con la filosofía de la complementariedad de Bohr. He dicho que la única interpretación posible de la función ψ , que tanto Einstein como Bohr consideran válida, es la interpretación estadística de Born, sin embargo, existe una diferencia esencial entre ellos en lo que se refiere a la aceptación final de esta teoría como descripción última de la realidad física. El primero no cree en su carácter definitivo; en cambio, Bohr sí. Por ello, Einstein declara:

“Mi animosidad contra la teoría estadística de los cuantos no se refiere al contenido cuantitativo, sino a la creencia actual de que esta manera de tratar los fundamentos de la física es, *en lo esencial*, definitiva”⁵⁵.

“Si se considera el método de la actual teoría cuántica como definitivo en principio, ello equivale a renunciar a una representación completa de

⁵⁵ EINSTEIN, A./BESSO, M., Correspondencia con Michele Besso, carta 157 de Einstein, fechada el 24 de julio de 1949, p. 362.

los estados reales. Se puede justificar este abandono si se admite que no existe ninguna ley para los estados reales, de manera que su descripción sería inútil. Dicho de otra manera, esto significa: las leyes no se refieren a las cosas, sino a lo que la observación nos enseña sobre ellas. (Las leyes relativas a la sucesión temporal de este conocimiento parcial son, sin embargo, completamente deterministas).

No puedo adherirme a ello. Creo pues que el carácter estadístico de la teoría actual está simplemente condicionado por la elección de una descripción incompleta⁵⁶.

Einstein estaba de acuerdo con esta interpretación estadística de ψ porque aquélla implicaba, de acuerdo con su criterio de realidad, que la mecánica cuántica no describe la realidad física salvo *indirectamente*, es decir, sólo describe el conocimiento que tenemos de ella en función de la observación y la experimentación. El motivo por el cual es una descripción indirecta es el siguiente: la consecuencia que Einstein extrae del tratamiento estadístico es que aquélla, la función ψ , no describe el proceso concreto de la transición de un estado a otro⁵⁷, ya que su descripción no se refiere al estado de un único sistema, sino al de un conjunto de sistemas⁵⁸, lo cual explica que diversas funciones ψ representen el mismo estado del sistema; sin embargo, esto revierte en lo anterior, a saber, que “la función ψ no puede ser interpretada como una descripción (completa) de un estado físico de un único sistema”⁵⁹. Dicho de otra forma, si los teóricos cuánticos no insistieran en que, a pesar del carácter estadístico de su teoría, ésta es

⁵⁶ *Ibid.*, p. 420.

⁵⁷ “... de acuerdo con nuestra concepción actual, las leyes cuánticas, aunque dejan indeterminado cada evento singular, predicen *estadísticamente* con una gran precisión el conjunto de eventos que han de producirse una y otra vez en la misma situación. Si esa estadística queda interferida por la intervención de algún agente, ese agente habrá violado las leyes de la mecánica cuántica tan a la fuerza como si se hubiera interferido -en la física pre-cuántica- con una ley mecánica estrictamente causal”. SCHRÖDINGER, E., *¿Puede ser la indeterminación física un argumento en favor del libre albedrío?* En: WILBER, K. (ed.), *Cuestiones Cuánticas*, p. 126.

⁵⁸ Cf. EINSTEIN/BORN, *Correspondance. 1916-1955*, carta 96 de Born, fechada el 4 de septiembre de 1945 (postdata), pp. 200-201.

⁵⁹ EINSTEIN, A., *Física y realidad* (1936), *Mis ideas y opiniones*, p. 286. Y en la misma página, algo más abajo, resume así la situación: “La mecánica cuántica proporciona, de esta manera tan simple, teoremas sobre transiciones (aparentemente) discontinuas de un estado a otro, sin brindar en rigor una descripción del proceso concreto; este hecho está conectado con otro: la teoría, en general, no opera con el sistema único, sino con una totalidad de sistemas”.

capaz de describir también los fenómenos individuales (eso sí, en un estado “real” indeterminado), Einstein aceptaría esta teoría como cualquier otra estadística de la física clásica; por esto asume la interpretación de Born.

Pero, Bohr defiende precisamente lo anterior: la física cuántica es capaz de ofrecer una descripción completa de un sistema físico individual pero en un estado “real” indeterminado porque las magnitudes que lo definen o propiedades físicas son fenoménicas, por ello tal tipo de descripción completa ha de ser “complementaria” y no simultánea dado que los estados de las magnitudes conjugadas de dicho sistema están indeterminados, y, con ello, se ha de afirmar que las propiedades espaciotemporales de aquéllos no son “reales”, no son independientes del acto de observación (mecanismo de medición), lo cual es una conclusión inaceptable para la concepción ontológica de Einstein⁶⁰. Por lo tanto, el tratamiento estadístico de la función ψ implica que no representa una situación real de un sistema particular⁶¹, sino, únicamente, una totalidad de sistemas y Einstein se pregunta:

“¿Existe realmente algún físico que crea que jamás llegaremos a tener una percepción de estos importantes cambios que se producen en los sistemas únicos, de su estructura y de sus conexiones causales, sin considerar el hecho de que los sucesos únicos han llegado a estar tan cerca de nosotros, gracias a la maravillosa invención de la cámara de Wilson y el contador Geiger? Es posible creer esto sin incurrir en contradicción lógica, pero resulta tan contrario a mi instinto científico

⁶⁰ Cf. EINSTEIN, A., “Remarks to the Essays Appearing in this Collective Volume”, pp. 667-672, in: SCHILPP, P.A., Albert Einstein: philosopher-scientist, vol. 2, pp. 663-688.

⁶¹ Razón por la cual, Einstein critica en una carta dirigida a Besso la respuesta de Pauli al artículo que aquél escribió para la revista trimestral *Dialéctica* («Reveu Internationale de la connaissance», Éd. du Griffon), en su número especial de abril dedicado a «L'idée de complémentarité», vol. 2, 1948: “¿Has notado también cuán ilógica era la respuesta de Pauli? Pone en duda que esta manera de proceder sea incompleta, pero dice inmediatamente después que la función Ψ es una representación *estadística* de la totalidad del sistema. Sin embargo, esto no es sino otra forma de la afirmación: ¡la representación del sistema particular (individual) es incompleta! El éxito momentáneo posee para casi todo el mundo más fuerza de persuasión que una reflexión de principio, y la moda los hace ciegos, aunque sólo sea temporalmente. Es una respuesta a observaciones críticas de mis colegas, que apareció en una recopilación que me han dedicado en la colección «Living Philosophers». La posteridad sabrá al menos cuáles eran mis ideas respecto a ello”. EINSTEIN, A./BESSO, M., Correspondencia con Michele Besso, carta 157 de Einstein, fechada el 24 de julio de 1949, p. 362. Véase también la carta que dirigió a Pauli, en respuesta a otra de éste tras haber leído dicho artículo, el 2 de mayo de 1948, publicada en: EINSTEIN, A., Quanta. Mécanique statistique et physique quantique, p. 249.

que no puedo abandonar la búsqueda de una descripción más completa”⁶².

Está claro que el tema de la discusión no es acerca de si la descripción estadística de ψ es una descripción completa de un conjunto de sistemas, sino que versa sobre si esta descripción es una descripción *completa* de un *sistema individual*. Ante la primera proposición, Einstein no ponía objeciones porque, si la física cuántica sólo describe conjuntos de sistemas, entonces, es fácil considerarla una teoría estadística en sentido clásico. Algo con lo que Bohr no estaba de acuerdo: su carácter estadístico no se refiere a la ignorancia por la complejidad de los numerosos datos, sino a “la imposibilidad de definir estas cantidades de una manera inambigua” debido a la ineludible interacción entre el sistema y los medios de observación, lo cual le permite afirmar que la descripción cuántica que nos ofrece la función ψ es una descripción completa del sistema individual, aunque indeterminada; pero esto implica una concepción sobre la “realidad” y el tipo de descripción física que eran inaceptables para Einstein⁶³. Por tanto, su conclusión es que la función de onda no ofrece una descripción completa de la realidad, ya que sólo representa las *probabilidades* de darse un estado u otro; pero no la realidad misma, salvo indirectamente, a través de nuestro conocimiento sobre ella:

⁶² EINSTEIN, A., *Física y realidad* (1936), en: Mis Ideas y Opiniones, p. 287.

⁶³ “Roughly stated the conclusion is this: Within the framework of statistical quantum theory there is no such thing as a complete description of the individual system. More cautiously it might be put as follows: The attempt to conceive the quantum-theoretical description as the complete description of the individual systems leads to unnatural theoretical interpretations, which become immediately unnecessary if one accepts the interpretation that the description refers to ensembles of systems and not to individual systems. In that case the whole «egg-walking» performed in order to avoid the «physically real» becomes superfluous”. EINSTEIN, A., “Remarks to the Essays Appearing in this Collective Volume”, pp. 671-672 (SCHILPP, P.A., Albert Einstein: philosopher-scientist, vol. 2, pp. 663-688). De una manera más contundente vuelve sobre esto en la p. 682, tras exponer la posible violación del principio de separabilidad espacial como una paradoja: “By this way of looking at the matter it becomes evident that the paradox forces us to relinquish one of the following two assertions:

(1) the description by means of the ψ -function is *complete*

(2) the real states of spatially separated objects are independent of each other.

On the other hand, it is possible to adhere to (2), if one regards the ψ -function as the description of a (statistical) ensemble of systems (and therefore relinquishes (1)). However, this view blasts the framework of the «ortodox quantum theory».

“La última creación de la física teórica, y la de mayor éxito, es decir la mecánica cuántica, difiere de manera fundamental tanto del esquema newtoniano como del esquema maxwelliano (...). La diferencia estriba en que las magnitudes que figuran en las leyes de la teoría cuántica no pretenden describir la misma realidad física, sino tan sólo las probabilidades de que se produzca una determinada realidad física”⁶⁴.

De todo esto, aquello que me interesa destacar es que está basando sus objeciones, relacionadas con el carácter estadístico de la mecánica cuántica, por un lado, en su concepción de “realidad física”, ya que las razones que esgrime en contra se deben, en definitiva, a que la física cuántica no ofrece una descripción directa de la realidad porque no atribuye a los fenómenos atómicos el rango de “realidad física independiente”, y, por otro lado, en su criterio ontológico, que determina si algo es real en función de su predictibilidad (valores bien definidos); por tanto, la indeterminación no pertenece a la realidad física, sólo afecta a nuestro conocimiento. Así, dice Einstein:

“La física es un esfuerzo por aprehender conceptualmente la realidad como algo que se considera independiente del ser percibido. En este sentido se habla de lo «físicamente real». En la física precuántica no había ninguna duda acerca de cómo entender esto. Lo real venía representado en la teoría de Newton por puntos materiales en el espacio y en el tiempo, en la teoría de Maxwell por un campo en el espacio y el tiempo. En la mecánica cuántica es menos transparente. Si se pregunta: ¿una función Ψ de la teoría cuántica representa una situación real en el mismo sentido que un sistema de puntos materiales o un campo electromagnético?, surge la duda entre el simple «no» y el simple «sí». ¿Por qué? Lo que expresa la función Ψ (en un momento determinado) es esto: ¿cuál es la probabilidad de encontrar una determinada magnitud física q (o p) en un determinado intervalo si la mido en el tiempo t ? La probabilidad hay que considerarla aquí como una magnitud empíricamente determinable, es decir, como una magnitud ciertamente «real» que puedo determinar si genero repetidas veces la misma función Ψ y hago cada vez una medición q . ¿Pero qué decir del valor de q medido? El sistema individual correspondiente ¿tenía ya este valor q antes de la medición? La pregunta no tiene ninguna respuesta determinada en el marco de la teoría, porque la medición es un proceso

⁶⁴ EINSTEIN, A., *La influencia de Maxwell en la evolución de la idea de realidad física* (1931), en: Mis ideas y opiniones, p. 241. Ver también, *Física y realidad* (1936), pp. 282-283.

que entraña una intervención finita desde el exterior en el sistema; sería por eso pensable que el sistema no adquiriese un valor numérico determinado para q (o para p), el valor numérico medido, sino a través de la propia medición”⁶⁵.

De este modo, si una teoría física es completa, entonces ha de ofrecer una descripción directa de la realidad y no quedarse en la descripción del conocimiento que podemos tener de ella, es decir, ha de representar objetivamente, en el sentido clásico, todos los fenómenos físicos⁶⁶. Hasta ahora, la discusión entre Einstein y Bohr se ha desarrollado en términos exclusivamente epistemológicos, donde el problema que se plantea es *cómo* una teoría *debe* describir la realidad, ya que es indudable que la física es una descripción de aquella:

“La verdadera dificultad tiene que ver con que la física es un tipo de metafísica: la física describe la «realidad». ¡O no sabemos nada de la realidad, o no la conocemos más que a través de la descripción que nos ofrece la física!

Toda física es descripción de la realidad; solamente esta descripción puede ser «completa» o «incompleta»⁶⁷.

Einstein piensa que esta descripción ha de contener magnitudes bien definidas, cuyos valores numéricos sean exactos porque la realidad no

⁶⁵ EINSTEIN, A., Notas Autobiográficas, pp. 77-78. También se puede consultar: *La influencia de Maxwell en la evolución de la idea de realidad física* (1931), en: Mis ideas y opiniones, p. 238.

⁶⁶ “(...) me imagino a dos físicos A y B que representan concepciones diferentes acerca del estado real descrito por la función ψ .

A. El sistema individual tiene (antes de la medición) un valor determinado de q (o de p) para todas las variables del sistema, concretamente “aquel” valor que es determinado en una medición de esas variables. Basándose en esta concepción declarará: la función ψ no es una representación exhaustiva del estado real del sistema, sino una representación incompleta; solamente expresa aquello que sabemos sobre el sistema gracias a mediciones anteriores.

B. El sistema individual no tiene (antes de la medición) ningún valor determinado de q (o de p). El valor medio nace, precisamente a través del acto de medir, bajo la acción conjunta de la probabilidad que le es peculiar gracias a la función ψ . Basándose en esta concepción declarará (o por lo menos podría declarar): la función ψ es una representación exhaustiva del estado real del sistema”. EINSTEIN, A., Notas Autobiográficas, pp. 78-79. El físico A representa la postura de Einstein y el físico B la de Born.

⁶⁷ EINSTEIN, A., Quanta. Mécanique statistique et physique quantique, carta de Einstein a Schrödinger, fechada el 19 de junio de 1935, p. 234.

puede estar *definida a medias*, ya que, los valores estadísticos sólo se refieren a nuestro conocimiento incompleto y no a la realidad. De modo que, una teoría ha de describir el comportamiento de los sistemas físicos como objetos autónomos perfectamente definidos, es decir, perfectamente localizados y determinados en el espacio y en el tiempo; esto mismo es, precisamente, lo que Einstein entiende por “estado real”:

“Mediante la ecuación de Schrödinger, se determina la propagación temporal de la función Ψ . Sin embargo, ésta no debe considerarse como la representación de un *estado real*, ni siquiera para un valor dado del tiempo. A propósito de esto, es fácil equivocarse a causa del empleo de la palabra «estado» para expresar lo que representa la función Ψ . Que esto no se pueda interpretar como un «estado real» se reconoce ya por el hecho de que la superposición de dos funciones y del mismo sistema es de nuevo una función Ψ . La superposición de estados reales no tiene ningún sentido, como se ve inmediatamente en el caso de los «macrosistemas».

Un estado real no se deja describir en la teoría cuántica actual; ésta proporciona solamente un conocimiento incompleto de un estado real. Los teóricos ortodoxos de los cuantos no admiten, en general, el concepto de estado real. Se llega así a una situación que se parece mucho a la del buen obispo Berkeley”⁶⁸.

Aquí Einstein tiene razón: si las teorías físicas han perdido la conexión con la realidad, que habían mantenido hasta la fecha, cómo podemos salir del fenomenismo y del idealismo solipsista. Bohr propuso un tipo de conexión diferente al del marco clásico: el uso analógico de sus conceptos. Pero sólo pudo postular esta salida, no la justificó y a Einstein le pareció, meramente, una solución de compromiso, por lo cual no “sintió”, como él mismo afirma a menudo, ninguna necesidad de adherirse a ella, sobre todo, porque en sus manos tenía el principio de separabilidad espacial, que venía a garantizar aquella conexión clásica a partir del carácter objetivo (“realista”) de las propiedades espacio-temporales de los sistemas físicos.

Éste es el momento en que entra en juego su criterio ontológico, es decir, su creencia en una realidad exactamente definida en todo instante y, por tanto, susceptible de predicción. Así, Einstein concluye que la descripción indirecta que nos ofrece la función de onda es consecuencia de

⁶⁸ EINSTEIN, A./BESSO, M., Correspondencia con Michele Besso, carta 190 de Einstein, fechada el 10 de septiembre de 1952, p. 417.

su carácter incompleto, porque tener que describir en términos de probabilidades es dar una descripción indirecta de la realidad que carece de objetividad, en sentido clásico⁶⁹. Ahora bien, esta objetividad implica una independencia entre el mundo y el sujeto que lo observa, se trata de una realidad clásicamente objetiva; razón por la cual la “independencia” es la nota característica de su concepción de “realidad física”. Toda la exposición de Einstein gira en torno a esta exigencia de “realidad física independiente”, ya que *el ideal de realidad objetiva* lo considera *un principio absoluto*.

Por tanto, si ahora volvemos al artículo EPR, podemos comprobar que toda la demostración final del dilema planteado en la página 778 se apoya en esta concepción: “o bien (1) la descripción mecánico-cuántica de la realidad dada por la función de onda no es completa, o (2) cuando los operadores correspondientes a dos magnitudes físicas no conmutan ninguna de ellas dos puede tener realidad simultánea”. Éste es el punto clave del artículo, ya que la conclusión de EPR, conforme a esto, es que no podemos negar (1) sin negar (2); es decir, que al defender la completud de la descripción mecánico-cuántica, tendríamos que afirmar también que las magnitudes canónicamente conjugadas (cuyos operadores no conmutan) tienen realidad física a pesar de su indeterminación, lo cual significaría que la naturaleza es esencialmente indeterminista⁷⁰. Esta situación es inconcebible para Einstein bajo su criterio de realidad y su implicación, el postulado de la localidad, e incluso considera que llegaríamos a una contradicción, porque tener realidad simultánea es poseer valores bien definidos (determinados) y si no tienen esos valores y, por tanto, carecen de

⁶⁹ También carece de todo contenido intuitivo, ya que es incapaz de representar espacio-temporalmente el mundo: la fundamentación intuitiva del lenguaje de la física clásica (contenido intuitivo de las teorías físicas) exige un lenguaje físico referencialista basado en el modelo de representación en el marco espacio-temporal, o en la imagen ostensiva (la que manifiesta la realidad en la teoría). Pero dejo esta cuestión para más adelante, cuando los elementos básicos de las posturas de ambos físicos queden bien definidos, porque precisa de muchas aclaraciones y matices, a los que aún no me he referido.

⁷⁰ La respuesta de Bohr, apenas dos meses después, no dejó duda alguna sobre la postura que éste mantuvo durante toda la polémica: si a causa de defender esto hemos de negar el criterio de realidad y la condición de completud, pues se niega, aunque esto suponga tener que admitir que los sistemas no son independientes a pesar de estar espacialmente separados. Desde el punto de vista de la complementariedad la descripción que la mecánica cuántica ofrece de los fenómenos físicos es completa. Sin embargo, se advierte una gran diferencia en el vocabulario que utiliza Bohr, dice “descripción de los fenómenos físicos” y no de la “realidad física”. Cf. BOHR, N., *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?*, *Physical Review*, vol. 48, 1935, (p. 223).

existencia simultánea es debido a que la realidad física no es independiente del sujeto que la observa; pero, entonces, ¿de qué tipo de realidad estaríamos hablando? Desde luego que no de la realidad clásica:

“Uno podría poner objeciones a esta conclusión sobre la base de que nuestro criterio de realidad no es suficientemente restrictivo. De hecho, uno podría no llegar a nuestra conclusión si se insiste en que dos o más magnitudes físicas pueden ser consideradas como elementos simultáneos de la realidad “sólo cuando ellas puedan ser simultáneamente medidas o predichas”. Bajo este punto de vista, ya que o una u otra, pero no ambas simultáneamente, de las magnitudes P y Q pueden ser predichas, ellas no son simultáneamente reales. Esto hace que la realidad de P y Q dependa del proceso de medida llevado a cabo sobre el primer sistema, sin perturbar el segundo de manera alguna. De ninguna definición razonable de realidad podría esperarse que permitiera esto”⁷¹.

Hasta aquí cualquiera podría estar de acuerdo; de hecho, este acuerdo depende de si aceptamos su criterio ontológico sobre la realidad física y, con él, el tipo de realismo que nos impone. Este es el principio filosófico del que parte Einstein; pero lo más importante de todo esto es que cualquier otro realismo, más allá de estos límites, es inconcebible para él, incluso carece de justificación, dado que la noción de “realidad física objetiva” está justificada y no puede ser abolida sin aportar razones más poderosas que las de partir de su propia invalidez.

Esta justificación viene aportada por el principio de separabilidad física de los sistemas, o también llamado “postulado de localidad”⁷², ya que el rasgo fundamental de esa realidad es que pueda ser representada espacio-temporalmente⁷³. Con esto querrá demostrar que no es posible admitir que las magnitudes canónicamente conjugadas tengan realidad física simultánea, ya que su indeterminación implica que las medidas efectuadas a una de ellas alteran el estado físico de la otra, aunque cada una se refiera a dos sistemas físicos separados espacialmente, con lo cual tendríamos que renunciar a la descripción espacio-temporal de los sistemas como una representación real y objetiva del mundo físico. De ahí que Einstein hiciera reiteradas afirmaciones como ésta, que he recogido a continuación:

⁷¹ EPR, p. 780.

⁷² Aunque algunos autores hacen una distinción entre las nociones de separabilidad y localidad, no entraré en ella para no complicar más la exposición, en cuyo caso ni tan siquiera introduciría cambios sustanciales en ésta.

⁷³ Este aspecto será objeto de estudio en el siguiente punto.

“Algunos físicos, y yo mismo entre ellos, no pueden creer que debemos abandonar para siempre, la idea de una representación directa de la realidad física en el espacio y en el tiempo; o que tengamos que aceptar el criterio que sostiene que los sucesos naturales son análogos a un juego de azar”⁷⁴.

En definitiva, para Einstein la descripción física ha de ser directa porque ha de poder representar *objetos autónomos perfectamente localizados en el espacio-tiempo*, lo cual la convierte en una descripción completa, porque el posible carácter estadístico de sus leyes sólo se aplica a la descripción de un conjunto de sistemas: el sistema individual se describe con leyes deterministas. Esta condición se la adjudicará a todas las magnitudes, incluidas las magnitudes conjugadas de Hamilton, gracias a la validez universal y absoluta del principio de separabilidad espacial de los sistemas físicos; en función de esto, la descripción cuántica es indirecta e incompleta porque dada la naturaleza estadística de sus leyes la incapacitan para representar aquellos objetos autónomos, individuales y localizados en el marco espacio-temporal.

La justificación de esto implica que las leyes estadísticas son fruto de un indeterminismo gnoseológico que sólo afecta a nuestro conocimiento de la realidad, pero no a la realidad en sí misma, autónoma e independiente. Es decir, el criterio ontológico es el requisito que ha de cumplir la *descripción física*, “directa” y “completa”, de la realidad, aunque, a su vez, éste se sustenta sobre el principio de separabilidad espacial o localidad.

d) La localidad: requisito del criterio de realidad

Es indiscutible que Einstein y Bohr parten de dos principios epistemológicos diferentes; estos principios pueden ser caracterizados de diferentes maneras, según qué elemento del discurso se decida resaltar: se puede hablar de *realidad objetiva* frente a la *doctrina del actor-espectador*, o, como hace Hübner, enfrentando las *sustancias* con las *relaciones*. Si bien admito que los principios de ambos pueden ser entendidos en los términos que los plantea Hübner, no estoy de acuerdo con la segunda parte

⁷⁴ EINSTEIN, A., Mis Ideas y Opiniones, p. 302.

de su declaración⁷⁵: Einstein aportó pruebas, justificó su principio, basándose en el postulado de la localidad y en la epistemología que construyó alrededor de aquél; por su parte, Bohr no tuvo tanta “suerte” y no pudo ofrecer una garantía como la de Einstein.

Aunque sí es cierto que ambos pretendían refutar las teorías del otro con argumentos que se derivaban de sus propios principios, lo cual ha provocado que un debate inteligente entre dos genios de la física se convierta en el “*diálogo para sordos*”, expresión utilizada por Ehrenfest, un testigo de excepción, cuando se refería a la polémica entre aquéllos. Ahora bien, cómo justifican ambos estos dos puntos de partida tan distintos.

De momento, me ocuparé del primero: para Einstein, su criterio ontológico estaba justificado por un hecho físico, que él y todos los físicos, hasta ese momento, tenían por algo innegable; se trata del principio de separabilidad espacial entre los sistemas físicos.

La consecuencia que la física cuántica arrojaba sobre la naturaleza de la actividad científica, que Einstein consideraba más aberrante, era, precisamente, la *teórica* violación del principio de separabilidad espacial y sus consiguientes implicaciones acerca de “acciones fantasmas” e “interacciones telepáticas”⁷⁶. Pero, este rasgo no estaba, suficientemente,

⁷⁵ “Kurt Hübner viewed the Bohr-Einstein debate as merely a reflection of two different or even diametrically opposed principles: one (expounded by Einstein) according to which physical reality consists of substances which possess properties independently of their relations to other substances, and the other (espoused by Bohr) according to which reality is essentially a relation between substances, measurement being a special case of such a relation. Moreover, Hübner declared, “for Einstein relations are defined by substances; for Bohr substances are defined by relations”. Hübner also claimed that neither Bohr nor Einstein succeeded in proving his own principle or in disproving that of the opponent for each based his argumentation on his own principle. According to Hübner, as we see, a consensus was not reached, not because the dispute was based on a failure to communicate or on a misunderstanding, but simply because the disputants never really came to grips with the fundamental issue of their dissension”. JAMMER, M., The Philosophy of Quantum Mechanics, pp. 157-158.

⁷⁶ Einstein expresa claramente, en la carta dirigida a Cassirer el 16 de marzo de 1937, que estas consecuencias, sacadas a la luz por el argumento EPR, son su objeción fundamental a la teoría cuántica, en tanto descripción física de la realidad: “Maintenant, je vais encore vous exposer brièvement pourquoi, selon moi, la mécanique quantique n’est pas une base satisfaisante de la description physique. Ma critique porte sur la relation entre la description et la réalité physique. J’estime que la description effectuée au moyen de la fonction ψ est une description *incomplète* du «réel». (...) on est obligué d’admettre, me semble-t-il, qu’en effectuant une mesure en 1, on ne peut pas influer sur l’état physique du point matériel 2, puisque les deux points matériels sont complètement séparés l’un de l’autre. En tout cas, mon instinct de physicien répugne à admettre une telle action à distance. De cela, il découlerait nécessairement que l’«état» physique «réel» du système 2 ne peut pas dépendre

acentuado en la descripción del experimento ideal que apareció en el artículo EPR⁷⁷, por ello Einstein redactó él mismo, de nuevo, este experimento, haciendo hincapié en dicha circunstancia, el cual cito íntegramente:

“Sea un sistema que en el momento t de nuestra observación se compone de dos sistemas parciales S_1 y S_2 , que en ese instante están espacialmente separados y (en el sentido de la física clásica) sin gran interacción mutua. Supongamos que el sistema total viene descrito completamente, en el sentido de la mecánica cuántica, por una función ψ conocida, ψ_{12} . Todos los teóricos cuánticos coinciden en lo siguiente. Si hago una medición completa de S_1 , obtengo, de los resultados de la medición y de ψ_{12} , una función ψ completamente determinada del sistema S_2 (llamémosla ψ_2). El carácter de ψ_2 depende entonces de “qué tipo” de medición efectúe yo sobre S_1 . Pues bien, a mi entender se puede hablar de la situación real del sistema parcial S_2 . De entrada, y antes de la medición sobre S_1 , sabemos menos aún acerca de esta situación real que acerca de un sistema descrito por la función ψ . Pero hay un supuesto al que deberíamos atenemos incondicionalmente: la situación (estado) real del sistema S_2 es independiente de lo que se emprenda con el sistema S_1 , espacialmente separado de él. Sin embargo,

du *type* de mesure que j’effectue en 1. (...) On peut certes admettre qu’une description plus précise serait inadéquate en ce sens que, pour une telle description, il n’y aurait pas de lois complètes. Mais, par là même, on concéderait implicitement qu’il n’existerait effectivement pas de lois *complètes* correspondant aux connexions réelles des choses entre elles.

Ou bien alors il faudrait se résoudre à penser qu’entre les points matériels 1 et 2 séparés l’un de l’autre, il y a une espèce d’interaction «télépathique», mais, à ce que je sache, aucun théoricien ne peut s’y résoudre”. EINSTEIN, A., Quanta. Mécanique statistique et physique quantique, p. 241.

⁷⁷ Como ya he dicho en varias ocasiones, no fue redactado por Einstein y en la carta, ya citada, dirigida a Schrödinger, también incluye su propia redacción del experimento, puesto que, tal y como le comunica a su colega vienés, él considera que en la versión de Podolsky, demasiado logicista, no se desarrolla lo suficiente el siguiente punto, que para Einstein es fundamental: “Le seul point essentiel ici est que Ψ_B et $\underline{\Psi}_B$ sont différents. J’affirmé que cette différence est incompatible avec l’hypothèse selon laquelle la description par Ψ est coordonnée de façon biunivoque à la réalité physique (à l’état réel). En effect, après la collision, l’état réel de **(AB)** est composé à partir de l’état réel de **A** et de l’état réel de **B** qui n’ont rien à voir l’un avec l’autre. *L’état réel de B ne peut pas dépendre de la mesure que j’entreprends sur A.* Or, il existe deux Ψ_B , deux (et même autant que l’on veut) candidats tout aussi légitimes l’un que l’autre pour le même état de **B** -en contradiction avec l’hypothèses d’une description biunivoque, et complète.

Remarque: que Ψ_B et $\underline{\Psi}_B$ puissent être considérées comme des fonctions propres des observables **B** et **B**, je m’en fiche”. *Ibid*, p. 236.

según el tipo de medición que efectúe sobre S_1 , obtengo una ψ_2 diferente para el segundo sistema parcial ($\psi_2, \psi_2^2 \dots$). Ahora bien, el estado real de S_2 tiene que ser independiente de lo que suceda con S_1 . Por lo tanto, para el mismo estado real de S_2 pueden hallarse (según la elección de la medición sobre S_1) diferentes funciones ψ . (Esta conclusión sólo cabe eludirla, o bien suponiendo que la medición sobre S_1 modifica {telepáticamente} el estado real de S_2 , o bien negando llanamente que las cosas que están espacialmente separadas poseen estados reales independientes. Ambas posibilidades me parecen completamente inaceptables)”⁷⁸.

Ya que fue el propio Einstein quien se molestó en redactar una y otra vez tal situación, con el fin de acentuar el punto verdaderamente esencial del problema y el fundamento de su crítica, en lo sucesivo me referiré a cualquiera de estas versiones posteriores⁷⁹ y no a la que apareció en el artículo conjunto, por tres razones. La primera, es que fueron pensadas y escritas por el propio Einstein, quien, además, no estaba de acuerdo con el enfoque logicista que Podolsky empleó a lo largo de todo el artículo E-P-R. La segunda es que este otro tipo de descripción del experimento ideal es el que él mismo cita con mayor frecuencia que el que apareció en el artículo conjunto y, además, es a esta explicación a la que siempre alude como justificación del criterio ontológico. En tercer lugar, y más importante, las aclaraciones que incluye acerca de la separabilidad de los sistemas físicos son fundamentales a la hora de comprender que la exigencia, que Einstein plantea a toda descripción de la realidad por parte de la Física, es la siguiente: una teoría ha de describir los *estados reales* de los sistemas físicos; es decir, ha de ofrecer una descripción de estos sistemas como objetos autónomos perfectamente localizados en el espacio

⁷⁸ EINSTEIN, A., Notas Autobiográficas, pp. 79-80. Y a continuación afirma lo siguiente: “Si los físicos A y B dan entonces este razonamiento por válido, B tendrá que abandonar su posición de que la función ψ es una descripción completa de una situación real, pues en ese caso sería imposible poder asignar a la misma situación (de S_2) dos funciones ψ diferentes. El carácter estadístico de la presente teoría sería entonces una consecuencia necesaria del carácter incompleto de la descripción de los sistemas en la mecánica cuántica, y no existiría ya motivo para suponer que la futura base de la física ha de fundarse en la estadística”.

⁷⁹ Sólo por citar unos ejemplos, uno de ellos se encuentra en: EINSTEIN, A., “Quanten-Mechanik und Wirklichkeit”, pp. 323-324. Dialéctica, vol. 2, 1948, pp. 320-324; de nuevo, otro igual aparece en: EINSTEIN, A., Mis ideas y opiniones, pp. 285-286, e, incluso en la carta a Schrödinger, que acabamos de citar (EINSTEIN, A.: Quanta. Mécanique statistique et physique quantique, p. 234-236).

y en el tiempo. Éste es, realmente, el criterio de Einstein, con el que juzga la “completud” de una teoría física y, en concreto, de la mecánica cuántica.

Pero, antes de entrar de lleno en esto, sostendré que la crítica de Einstein puede esquematizarse de la siguiente manera. La física cuántica no es una teoría completa porque: 1) no ofrece una descripción objetiva de la realidad, físicamente independiente del sujeto, y por ello es una descripción indirecta; 2) la teoría no representa directamente la realidad autónoma dado su carácter estadístico; 3) esta descripción indirecta implica que no existe conexión entre la realidad y la teoría que, supuestamente, la describe; 4) por tanto, la mecánica cuántica es incompleta porque carece de contenido físico. Estos cuatro argumentos de Einstein se fundamentan desde el criterio ontológico: la realidad física es una realidad autónoma, físicamente independiente del sujeto, y desde el criterio de completud, al que Einstein añade el postulado de la localidad: ha de haber conexión entre la realidad y la teoría y, como la realidad se caracteriza por la separabilidad espacial de los sistemas físicos, la teoría ha de respetar este principio. Hasta ahora me he centrado en los dos primeros puntos; en adelante, desarrollaré el tercero y dejaré para el próximo capítulo, la demostración del último.

Ya he hablado de lo poco que le satisfizo a Einstein el criterio de completud, propuesto por Podolsky; en cuanto al criterio ontológico, Einstein tampoco quiso volver a mencionarlo con el mismo nombre, pero siguió aludiendo a él, en sus escritos posteriores, como el “principio de realidad”. Lo cual nos inclina a afirmar, junto con Jammer, que este criterio fue una contribución de Einstein al artículo EPR y que, además, presupone el principio de separabilidad espacial.

El principio de separabilidad es la propiedad “real” o “física” que tiene todo sistema de mantenerse independiente de cualquier otro sistema físico que esté espacialmente separado de él. El criterio ontológico sobre la realidad física que defiende Einstein supone la validez de este principio⁸⁰,

⁸⁰ “Since this statement of assertability of an “objective reality” of a particle’s property on grounds of its determinability without disturbing the particle obviously expresses the gist of the EPR reality criterion, we are on safe ground to assume that the reality criterion as stated in the EPR paper has been contributed by Einstein. But such an assertability clearly presupposes what has been called “the principle of separability” (“Trennungsprinzip”), that is the claim that the state of a system is independent upon what happens to another system, sufficiently separated in space from the former, even if the two systems have been interacting with each other in the past. It was the status of this separability principle in quantum mechanics which has been occupying Einstein’s mind for a long time”. JAMMER, M., The Conceptual Development of Quantum Mechanics, p. 214.

ya que aquél depende de que ninguna medición efectuada en cierta región del espacio, llamémosla **A**, pueda alterar en lo más mínimo la realidad física de la región **B**, porque ambas son físicamente independientes⁸¹ y, en consecuencia, todo aquello que tiene una existencia real debe tener una localización espacio-temporal.

Es decir, tal concepción de la realidad física, supone la espacialidad del mundo, en el que los objetos tienen una existencia autónoma. Pero, a su vez, implica su representabilidad lingüística pues así es cómo se nos manifiestan: si todo lo que existe realmente tiene una localización en el espacio y en el tiempo, implica que la realidad es representable bajo estos conceptos; tenemos suerte, entonces, porque nuestra percepción del mundo también se construye a partir de ellos, de forma que siempre podemos tener una descripción espacio-temporal de todos los objetos materiales. Pero, éste es el modelo clásico de descripción, que supone una serie de postulados, entre ellos el del isomorfismo estructural entre la realidad y nuestro modo de percibirla y describirla a través del lenguaje. Este postulado también está implícito en la condición de completud, dada en EPR.

Tal criterio sobre la realidad se corresponde con la concepción clásica y, más concretamente, con la idea que ésta defendía acerca de que los elementos básicos de la realidad tienen un carácter físico precisamente definido en su localización espacio-temporal, los cuales son representables desde la teoría a modo de imagen o reflejo de la realidad⁸². Además, este

⁸¹ “L’idée qui caractérise l’indépendance relative des choses distantes spatialement (*A* et *B*) est la suivante: toute influence extérieure s’exerçant sur *A* n’a aucun effet sur *B* qui ne soit *médiatisé*. Ce principe est appelé «principe des actions par contiguïté» et seule la théorie du champ en a fait une application conséquente. L’abolition complète de ce principe fondamental rendrait impensable l’existence de systèmes (quasi) fermés et donc l’établissement de lois empiriquement vérifiables, au sens habituel du terme”. EINSTEIN, A., “Mécanique quantique et réalité”. EINSTEIN, A., “Mécanique quantique et réalité” en: Dialectica, vol. II, 3-4, (1948), pp. 320-324. Incluido en: EINSTEIN, A., Quanta. Mécanique statistique et physique quantique, pp. 244-248. (La cita corresponde a la página 247). También se encuentra este artículo en: EINSTEIN, A. / BORN, M., Correspondance. 1916-1955, carta 88 de Einstein, fechada el 5 de abril de 1948, pp. 184-188, ya que Einstein lo incluye en la carta que envía a Born.

⁸² La fórmula del referencialismo directo con la que el “realismo cercano” de la física clásica describía el mundo se corresponde de forma general con la concepción que tenía Einstein de la realidad. Esto puede verse, claramente, a partir de la descripción que hace Hooker del ideal newtoniano: “Thus, in the Newtonian ideal, the world consisted of objects having precise spatial boundaries and spatiotemporal locations, and which were further characterized by a finite number of attributes (mass, velocity, acceleration, orientation, shape, size and position). The addition of the electromagnetic theory meant that these same Newtonian objects now possessed another property-charge. In addition, the electromagnetic

criterio le lleva, por otro lado, a la defensa del determinismo físico, ya que si la realidad existe tal y como es, al margen de la medición (objetividad clásica), y sus elementos son localizables en el espacio y en el tiempo, entonces tenemos que:

“El objetivo de la ciencia es establecer normas generales que determinen la conexión recíproca entre objetos y acontecimientos en el espacio y en el tiempo. Estas normas, o leyes de la naturaleza, exigen una validez absolutamente general... no probada. Es básicamente un programa, y la fe en la posibilidad de su cumplimiento sólo se basa en principio en éxitos parciales. Pero difícilmente podría alguien negar estos éxitos parciales y atribuirlos a la ilusión humana. El hecho de que basándonos en tales leyes podamos predecir el curso temporal de los fenómenos en ciertos campos con gran precisión y certeza, está profundamente enraizado en la conciencia del hombre moderno, aunque pueda haber captado muy poco del contenido de las citadas leyes”⁸³.

En pocas palabras, el criterio de realidad de Einstein tiene dos implicaciones: 1) la realidad es espacio-temporalmente representable por la teoría; 2) sobre esta realidad se pueden construir leyes físicas deterministas. Todo esto parece razonable, pero no olvidemos que la base sobre la que se sustenta es tan fuerte o tan frágil como pueda serlo un simple postulado: el principio de localidad espacial⁸⁴. Si éste fuera violado, el principio de

field was assigned a physical attribute -intensity- at every point in space-time, but the basic picture (...) remained unaltered”. HOOKER, C. A., *The Nature of Quantum Mechanical Reality*, p. 70.

⁸³ EINSTEIN, A., “Ciencia y religión (Parte II)” (1941), *Mis ideas y opiniones*, p. 41.

⁸⁴ Que la separabilidad espacial de los sistemas sea el pilar esencial sobre el que Einstein levanta su argumentación es algo que él mismo declara en múltiples ocasiones como ésta, en la que se refiere a Bohr con el término *filósofo talmudista*: “Quant au philosophe talmudiste, il se fiche pas mal de la «réalité», cet épouvantail tout juste bon à effrayer les âmes naïves. Il explique que les deux conceptions ne diffèrent que par leur mode d’expression.

Voici quelle est ma manière de penser à moi. On ne peut avoir prise sur le talmudiste qu’en ayant recours à un principe additionnel, le principe de séparation. A savoir: «la deuxième boîte (avec tout ce qui a trait à son contenu) est indépendante de ce qui se passe dans la première boîte (systèmes partiels séparés)». Si l’on adopte le principe de séparation, on exclut par là même la deuxième conception «à la Schrödinger» et il ne reste plus que celle de Born, selon laquelle, toutefois, la description donnée plus haut de l’état est une description *incomplète* de la *réalité* ou des états réels”. EINSTEIN, A., *Quanta. Mécanique statistique et physique quantique*, carta de Einstein a Schrödinger, fechada el 19 de junio de 1935, p. 235.

realidad de Einstein no sería válido y sin éste no le quedarían argumentos para considerar que la descripción cuántica de la realidad fuera indirecta y, por tanto, incompleta; además, esto abriría una puerta al “realismo lejano” de Bohr. Por lo tanto, lo que está en juego es el materialismo del realismo científico y la objetividad clásica, pero también lo está la existencia real del espacio físico, y como consecuencia de lo anterior, la conexión que las teorías físicas han de mantener con la realidad. A continuación esbozaré los puntos argumentativos de esta afirmación.

La validez de la condición de completud para toda teoría física también depende de este postulado sobre la localidad, ya que aquella se basa en el criterio de realidad y, así, supone tres requisitos: primero, que todos los elementos de la teoría tengan su propio correlato en la realidad, esto es, que se correspondan con algún elemento de ésta⁸⁵, lo que implica un representacionismo del lenguaje científico, en segundo lugar, que aquella realidad sea independiente de todo acto de medición y, por último, que la nota distintiva, o condición *sine qua non*, de esta realidad ha de ser la predictibilidad. Estos tres rasgos son los que la aparición de la discontinuidad cuántica ha vuelto por principio impracticables; situación que, como ya se sabe, se hace teóricamente explícita en las relaciones de incertidumbre. Merleau-Ponty esquematiza el argumento EPR, subrayando dos hipótesis:

“Hipótesis α : en una teoría *completa*, hay un «elemento» que corresponde a cada «elemento» de la realidad. Hipótesis β : una condición suficiente para la realidad de una cantidad física es que sea exactamente predecible sin perturbar el sistema al que pertenece”⁸⁶.

Más tarde advierte del carácter filosófico de ambas hipótesis, el isomorfismo estructural entre el mundo y el lenguaje, implícito en la primera y el determinismo implicado en la segunda:

“Pero hay que rendirse a la evidencia de que estas hipótesis imponen exigencias epistemológicas y ontológicas muy fuertes, particularmente la primera; en efecto, implica que la multiplicidad en cierto modo articulada de la realidad física se puede poner en correspondencia biunívoca, siguiendo las mismas articulaciones lógicas, con la

⁸⁵ Adviértase la relación de esta condición inicial con las ideas de Russell, expuestas en el apartado 6.1.

⁸⁶ MERLEAU-PONTY, J.: Albert Einstein. Vida, obra y filosofía, p. 184.

multiplicidad de los conceptos o símbolos del lenguaje”(…). “En cuanto a la segunda -se refiere a la hipótesis β -, al hacer de la perceptibilidad un criterio de realidad, conduce a una versión muy fuerte de realismo; ... el valor numérico de una magnitud se ve afectado por la hipótesis de una realidad independiente de toda operación de medida; ... impone el axioma del determinismo en su forma más estricta como condición para una descripción aceptable de la naturaleza. En efecto, suponer *a priori* la validez de la inferencia que va de la predictibilidad a la realidad, implica que el orden deductivo intemporal que permite la predicción es formalmente idéntico al orden sucesivo de los sucesos naturales(...). En cuanto al determinismo implicado por la hipótesis β , es spinozista (o, si se quiere, metafísico) y no epistemológico (o, si se quiere, kantiano), porque obliga al orden de los conocimientos a ajustarse exactamente al orden de las cosas, planteando, al menos implícitamente, la posibilidad de acuerdo entre uno y otro como algo totalmente independiente de las condiciones del conocimiento”⁸⁷.

Bohr, al igual que otros muchos autores, interpreta la oposición de Einstein a la física cuántica desde el prisma de la tercera condición, la de la predictibilidad, por ello convierte su polémica con aquél en un problema de determinismo; cuando, en realidad, Einstein trata el determinismo en segundo término y como consecuencia del segundo factor, ya que es la segunda exigencia la que considera el epicentro del argumento principal. Es decir, que su criterio de realidad, antes que referirse directamente al determinismo físico, consiste en lo siguiente: todo aquello que tiene una *existencia real* debe estar *localizado en el espacio* de tal forma que ninguna medición efectuada a cierta distancia pueda alterar en lo más mínimo su estado real físico. De manera que en esto consiste, exactamente, la primera premisa del criterio de realidad y no el determinismo, que tiene un valor secundario como premisa derivada de la principal. Por este motivo, Einstein se dirige así a su amigo Besso:

“¿En qué relación se encuentra el «estado» («estado cuántico») descrito por una función Ψ con una situación real determinada (que llamaremos «estado real»)? El estado cuántico ¿caracteriza completamente (1) o sólo incompletamente (2) un estado real?

No se puede responder sin más a esta pregunta, pues cada medida representa una intervención incontrolable en el sistema (Heisenberg). El estado real no es pues algo inmediatamente accesible a la experiencia, y su apreciación sigue siendo hipotética. (Comparable al concepto de

⁸⁷ *Ibid*, pp. 186-187.

fuerza de la mecánica clásica si no se fija *a priori* la ley del movimiento). Las suposiciones (1) y (2) son pues en principio ambas posibles. No se puede tomar una decisión a favor de una o la otra sino después del examen y la confrontación de la admisibilidad de sus consecuencias.

Yo descarto (1), pues nos obliga a admitir que existe una ligadura rígida entre partes del sistema alejadas unas de las otras de manera cualquiera en el espacio (acción a distancia inmediata, que no disminuye cuando la distancia aumenta). He aquí la demostración:

Un sistema S_{12} , de función Ψ_{12} conocida, se compone de dos sistemas parciales, S_1 y S_2 muy alejados uno del otro en el instante t . Si se efectúa una medida «completa» en S_1 , se puede hacer de distintas maneras (según que se mida, por ejemplo, los impulsos o las coordenadas). A partir del resultado de la medida y de la función Ψ_{12} se puede determinar, por los métodos corrientes de la teoría cuántica, la función Ψ_{12} del segundo sistema. *Esta última puede tomar formas diferentes*, según el *procedimiento* de medida aplicado a S_1 .

Pero esto está en contradicción con (1), *si se excluye una conexión a distancia*. Entonces la medida en S_1 no produce ningún efecto sobre el estado real de S_2 y por tanto, según (1), ningún efecto sobre el estado cuántico de S_2 descrito por Ψ_2 .

Ello me obliga a pasar a la suposición (2), según la cual el estado real de un sistema sólo queda descrito de manera incompleta por la función Ψ »⁸⁸.

Dado que esta separabilidad espacial, o física, implica que las diferentes regiones del espacio sean siempre independientes, en virtud de este principio, los objetos físicos pueden tener una “existencia autónoma”, ya que podemos situarlos en un continuo espacio-temporal donde los diferentes objetos ocupan diferentes regiones del espacio. Sin esta idea no se podría defender la existencia de sistemas cerrados, lo cual haría imposible, siempre según Einstein, la elaboración de leyes empíricamente verificables; esto es, leyes deterministas⁸⁹. Sin embargo, he de reiterar que

⁸⁸ EINSTEIN, A./BESSO, M., Correspondencia con Michele Besso, carta 192 de Einstein, fechada el 8 de octubre de 1952, pp. 419-420.

⁸⁹ “Si l’on se demande ce qui, indépendamment de la théorie quantique, caractérise le monde des idées de la physique, ce qui frappe tout d’abord c’est que les concepts de la physique se rapportent à un monde extérieur, autrement dit, on se fait une idée de choses (corps, champs, etc.) qui revendiquent une «existence réelle» indépendante du sujet de la perception, ces idées étant, par ailleurs, mises en rapport de la façon la plus sûre possible avec les impressions des sens. De plus, ce qui caractérise les choses de la physique, c’est qu’elles sont pensées comme étant rangées dans un continuum d’espace-temps. Et, ce qui

no era esta consecuencia lo que más preocupaba a Einstein, sino la premisa de la que partía acerca de la separabilidad espacial de cualquier sistema físico, pues éste era, precisamente, su requisito para la *realidad* de los objetos físicos y también el motivo por el cual Einstein sostiene que las nociones clásicas son *intuitivas*, ya que éstas expresan claramente la “existencia autónoma” de aquéllos, los objetos físicos, en el marco espacio-temporal⁹⁰.

Aunque no profundizaré en esto ahora; de momento, sólo adelantaré que su criterio para decidir sobre el contenido intuitivo de una teoría, esto es, acerca de su conexión con el mundo físico y la experiencia, no se reduce simplemente al representacionismo pictórico de las nociones físicas, que se mantenía en el marco conceptual de la física tradicional, sino que remite, en un sentido más amplio, a la capacidad de representación espacial, no limitada a la representabilidad en el espacio euclídeo de la mecánica clásica que poseen dichas nociones. Por ello, Einstein no se conformará con la filosofía del físico danés y propondrá una teoría física (a partir de la cual desarrollará una alternativa epistemológica, en la que ya se ha asumido la incompletud de la física cuántica) que, sustituyendo a la teoría cuántica, restaure la causalidad física y donde se respete, por supuesto, la separabilidad espacial de los sistemas, su propiedad de localidad.

paraît essentiel dans cet arrangement des choses introduites en physique, c'est qu'à un moment donné ces choses revendiquent une existence autonome dans la mesure où elles se trouvent dans des «parties différentes régions de l'espace». Sans cette hypothèse d'existence autonome (un «être-ainsi») des choses spatialement distantes -hypothèse issue, à l'origine, de notre expérience de tous les jours-, la pensée physique, au sens qui nous est habituel, serait impossible. On ne voit pas non plus comment, sans cette distinction bien nette, il serait possible de formuler des lois physiques et de les vérifier. La théorie du champ a développé à l'extrême ce principe, dans la mesure même où les choses élémentaires, existant de façon indépendante les unes des autres, sur lesquelles elle se fonde, ainsi que les lois élémentaires qu'elle postule pour celles-ci, y sont localisées à l'intérieur d'éléments spatiaux (à quatre dimensions) infiniment petits”. EINSTEIN, A., “Mécanique quantique et réalité”. Dialectica, vol. II, 1948, pp.320-324. Recogido en: EINSTEIN, A., Quanta. Mécanique statistique et physique quantique, pp. 246-247. (También, en nota 61, en la página 220).

⁹⁰ “Je trouve que renoncer à une appréhension spatio-temporelle du réel est {une position} idéaliste et spiritiste. Cet orgie de spiritueux épistémologique doit cesser. Tu penseras certainement en riant de moi qu'il arrive souvent qu'une jeune hétéaire se transforme en vieille bigote et un jeune révolutionnaire en un vieux conservateur”. EINSTEIN, A., Quanta. Mécanique statistique et physique quantique, carta de Einstein a Schrödinger, con fecha del 17 de junio de 1935, p. 234.

De esta forma, la nueva vía de Einstein, “esencialmente” clásica pero no “totalmente”, propone una vuelta a la descripción causal y espacial porque, en última instancia, aquello que está persiguiendo es la completud de una teoría, garantizada por el grado de comprensión que nos ofrece del mundo físico, que para Einstein forzosamente ha de pasar, como ya mostraré a su tiempo, por la intuición espacial, es decir, la descripción espacio-temporal de los sistemas físicos⁹¹. He aquí que se precisa una aclaración: dado que para Einstein el espacio y el tiempo constituyen elementos objetivos de la realidad, una representación real y objetiva de la realidad física ha de ser una representación, que se podría denominar “pictórica”, en el sentido de ser una descripción espacio-temporal bien definida, sin indeterminaciones; pero, prefiero limitar los términos “pictórico” y “visualizable” al marco conceptual de la física clásica propiamente dicho, es decir, a la descripción mecánica de los objetos materiales en un espacio euclídeo y un tiempo “plano” (homogéneo y continuo, es decir, un tiempo espacializado), porque Einstein, cuestión en la que me adentraré más adelante, no se refiere a este tipo de espacio, como el factor determinante de la realidad objetiva de los elementos físicos; esto es aquello que se “esconde” y reposa en el fondo de su criterio de realidad: los cimientos de su realismo crítico.

No obstante, con este método, Einstein está exigiendo algo que para Bohr es imposible que la física, dado su estado actual, pueda volver a ofrecer nunca más. Situación ésta que experimentos posteriores como el de Aspect⁹² vinieron a corroborar, echando por tierra el postulado de la localidad espacial, que Einstein defendió tan tenazmente.

Antes de entrar en la alternativa física y epistemológica que ofreció Einstein, me centraré en la respuesta de Bohr a las nuevas objeciones de Einstein y su actitud hacia ellas, retomando la Polémica y partiendo, ahora, de la intervención de Bohr.

⁹¹ “Je ne peux te donner de mon attitude en physique une explication qui te la ferait paraître rationnelle d’une quelconque manière. Je comprends, évidemment, que l’interprétation statistique, dont tu fus le premier à reconnaître la nécessité dans le cadre du formalisme existant, a un contenu de vérité considérable. Je ne peux, en conséquence, pas y croire sérieusement, car la théorie est incompatible avec le principe selon lequel la physique doit représenter une réalité de l’espace et du temps, sans action fantôme à distance”. EINSTEIN/BORN, Correspondance. 1916-1955, carta 84 de Einstein, fechada el 3 de marzo de 1947, pp. 173-174. También, ver: pp. 180-181.

⁹² Este experimento será objetivo de un posterior análisis junto con las alternativas que surgieron y que se conocen por el nombre de “teorías de variables ocultas no-locales”.

5.2) *La Respuesta de Bohr: ¿Por Qué es Completa la Mecánica Cuántica?*

En el anterior apartado he recogido de manera íntegra, pero sin realizar un análisis crítico, la tesis que mantuvo Einstein; ahora, cederé la palabra a Bohr.

En cuanto a la conclusión del artículo EPR Bohr admite, y me parece muy difícil mantener un desacuerdo, que el razonamiento formal es correcto; no existe paradoja alguna o incoherencias lógicas en la argumentación. Allí se afirma que, si la descripción dada por la física cuántica se ajustara debidamente a la realidad, esto significaría que la separabilidad espacial de los sistemas físicos sería violada⁹³. Como, por aquel entonces, no se podía realizar ningún experimento que corroborara dicha violación y como, además, era una idea autocontradictoria⁹⁴ y contraria al sentido común y a la relatividad general, Einstein creyó encontrar, de una vez por todas, la prueba de que la física cuántica era incompleta y que, por tanto, era posible concebir una nueva teoría del tipo clásico que la sustituyera⁹⁵.

Por el contrario, Bohr apostó por una forma de conceptualizar la realidad en la que no se respetara el principio de localidad, pero que sirviera para describir físicamente el mundo atómico siguiendo las reglas de cuantización y no-conmutabilidad, con lo cual la mecánica cuántica consigue ofrecer una descripción completa, cuyos conceptos conservan un contenido intuitivo, de los fenómenos físicos aunque no logre una representación directa de éstos como objetos independientes de la observación.

⁹³ O también podría decirse así, como hace Pais, evitando el aspecto paradójico que tal afirmación en realidad no posee: el artículo EPR “simplemente, llega a la conclusión de que la realidad objetiva es incompatible con la suposición de que la teoría cuántica es completa”. PAIS, A., *El Señor es sutil... La ciencia y la vida de Albert Einstein*, p. 457.

⁹⁴ Einstein piensa que es una idea que se contradice a sí misma porque define la realidad de tal modo que toda descripción física de ésta ha de incluir la espacialidad de los sistemas.

⁹⁵ Sin embargo, Aspect diseñó años más tarde, un experimento basado en las desigualdades de Bell, donde los sistemas atómicos no respetaban la separabilidad espacial. Por tanto, y según el propio argumento de Einstein, *se podría* concluir, de los resultados de dicho experimento, que la física cuántica es una teoría totalmente correcta y completa.

a) Los argumentos de la intervención de Bohr

A partir de 1935 y a raíz de este artículo de Einstein, Podolsky y Rosen, Bohr matizará su lenguaje, como ya expuse en el capítulo anterior, con el fin de aclarar su posición frente a la de Einstein: ya no hablará más de “objetos”, sino de “fenómenos”, así como tampoco lo hará de “perturbación de la medida”, sino de “interacción observacional” a partir de la cual surgen las propiedades fenoménicas, que son el resultado de esta interacción de los objetos con sus dispositivos experimentales.

Tal concepción sobre la naturaleza de la observación arrojará nuevas consideraciones sobre la noción de objetividad y sobre el uso de los conceptos descriptivos. No obstante, para Bohr el artículo EPR sólo contenía otro experimento ideal más de Einstein y lo refutó del mismo modo como había hecho con los otros: partió de las premisas teóricas de la física cuántica e ignoró el principio epistemológico de Einstein, por considerarlo de una naturaleza diferente a la cuestión fundamental que se estaba debatiendo⁹⁶. En este caso, rechazó el criterio de realidad, que aquél incluía como supuesto indubitable, y aceptó, implícitamente, las consecuencias de la violación del principio de localidad.

En su respuesta al artículo de Einstein-Podolsky-Rosen expone un breve resumen de su filosofía de la complementariedad, en la que se destierra el principio epistemológico del que parte el artículo EPR.

En otras palabras, Bohr se propone demostrar que el *criterio de realidad*, defendido por los tres físicos, *contiene*, como él mismo dice, “una *esencial ambigüedad*”, que le impide ser la base de la que parta ninguna condición de completud; en cambio, él expondrá su propia interpretación de la física cuántica, la filosofía de la complementariedad, porque en su opinión ella sí puede aportarnos un criterio racional, libre de ambigüedades, para decidir la completud de una teoría en el dominio atómico⁹⁷. A continuación diseccionaré los argumentos con los cuales justificó esto.

⁹⁶ Selleri, físico contrario a las ideas de Bohr, resume así la actitud de éste: “Puede decirse que, en esencial, Bohr no cuestionaba la corrección del razonamiento de EPR, una vez que se aceptan todas sus premisas, implícitas y explícitas. La contestación de Bohr supone, más bien, que el formalismo mecánico cuántico no puede adaptarse a un punto de vista filosófico como el de Einstein, sino que la teoría cuántica debe aceptarse a la fuerza junto a la interpretación filosófica desarrollada en Copenhague y Gotinga”. SELLERI, F., El debate de la teoría cuántica, p. 131.

⁹⁷ “It is shown that a certain “criterion of physical reality” formulated in a recent article with the above title by A. Einstein, B. Podolsky y N. Rosen contains an essential ambiguity when it is applied to quantum phenomena. In this connection a viewpoint termed

1) La situación en común, defendida por ambos, es la siguiente: *los experimentos y las mediciones físicas son las que nos informan sobre la realidad*⁹⁸; ahora bien, los experimentos y las mediciones efectuadas en física cuántica nos dicen algo sobre la realidad que contradice la noción de realidad objetiva independiente, por lo tanto, una de las dos es falsa. Lo más razonable es poner en duda, primeramente y de acuerdo con el artículo EPR, la descripción de la realidad que nos ofrece la física cuántica e intentar demostrar su incompletud a partir de otros experimentos que sí respeten aquella noción de realidad; pero, si esto no se consigue, ¿hemos de aceptar las implicaciones de esta nueva física como algo definitivo? Bohr pensaba que sí, porque antepone la validez de una teoría físicamente construida y avalada por la experiencia a cualquier principio de las anteriores teorías, aunque aquél esté firmemente establecido y respaldado por ellas.

2) Ya mencioné cuál es el principio del que parte Einstein en sus razonamientos; en cuanto al principio epistemológico de Bohr es bien sabido que se trata de la llamada “doctrina del actor-espectador”. Por un lado, en esta postura que Bohr defiende, *las nociones clásicas son imprescindibles*; pero, por otro, propone que *su uso ha de ser modificado*. ¿Por qué? Porque son términos que han madurado en el seno de la física clásica, donde su correspondencia con los objetos físicos les capacitaba para dar una imagen especular del mundo natural, es decir, con sus propiedades geométricas y dinámicas perfectamente definidas y determinadas, bien delimitadas (independientes) y objetivas (al margen de toda observación); sin embargo, ahora, a pesar de que ésta fuera su función

“complementarity” is explained from which quantum-mechanical description of physical phenomena would seem to fulfill, within its scope, all rational demands of completeness”. *Respuesta de Bohr*, p. 223.

⁹⁸ Este punto de partida empirista es compartido tanto por Einstein como por Bohr. El primero afirma lo siguiente: “This experience, which alone enables us to make inferences about reality, in physics takes the form of experiment and measurement”. A lo cual añade más adelante: “The elements of the physical reality cannot be determined by *a priori* philosophical considerations, but must be found by an appeal to results of experiments and measurements”. EPR, p. 777. En cuanto a Bohr, éste dice así: “The extent to which an unambiguous meaning can be attributed to such an expression as “physical reality” cannot of course be deduce from *a priori* philosophical conceptions, but -as the authors of the article cited themselves emphasize- must be founded on a direct appeal to experiments and measurements”. BOHR, N., *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?* p. 223. A partir de ahora, me referiré a este artículo, de forma abreviada, como *Respuesta de Bohr*.

básica en el marco clásico, nada de aquello les es permitido en la región atómica.

3) De ahí que el reajuste en el significado de los términos clásicos haya sido provocado por la aparición de la discontinuidad en los procesos atómicos, que no sólo rompe con el principio de causalidad fuerte, sino que también introduce la *inseparabilidad del objeto observado y el instrumento preparado para su observación*, ya que, cuando cambiamos de instrumento para observar otra propiedad del objeto, distinta a la que habíamos medido anteriormente, aquél interacciona con el objeto en tal medida que altera el estado observado en primera instancia: las propiedades geométricas y dinámicas no son independientes. La medición de una afecta al resultado de la otra y sólo están perfectamente determinadas cuando restringimos la observación a uno solo de los dos tipos de propiedades. Esta situación le otorga al acto de observación un papel mucho más importante que el que tenía en el marco clásico: la medición es capaz de definir⁹⁹ las propiedades de los objetos observados, por tanto, hemos de incluir el dispositivo experimental en la descripción que hagamos de nuestra experiencia sobre el objeto bajo investigación¹⁰⁰. Einstein no tiene en cuenta la modificación que la discontinuidad nos obliga a realizar en estas nociones de “observación” y de “objetividad”; ésta es la razón de que Bohr afirme que la contradicción, que presenta el artículo EPR entre la descripción que da la física cuántica y la descripción que debería dar de la realidad, es sólo aparente, ya que depende del concepto de realidad física que estemos manejando:

“La aparente contradicción, de hecho, sólo revela una esencial inadecuación del punto de vista ordinario de la filosofía natural para una explicación racional de los fenómenos físicos del tipo con el que tratamos en mecánica cuántica. Verdaderamente, la interacción finita entre el objeto y los dispositivos de medida, condicionada por la propia existencia del cuanto de acción, entraña -a causa de la imposibilidad de

⁹⁹ La medición no “alterar”, sino que “define”, en el sentido de ser capaz de *provocar la aparición* de las propiedades fenoménicas de los objetos observados.

¹⁰⁰ Esta situación es la que se denomina como “la doctrina del actor-espectador”, la cual tiene su fundamento en la noción de “observación” y de “fenómeno” dentro de la teoría de Bohr; pero, aquélla no se reduce a una mera circunstancia empírica, sino que, además, viene avalada fuertemente desde la teoría por las relaciones de incertidumbre de Heisenberg, ya que éstas fueron *directamente deducidas del formalismo matemático* de la mecánica matricial. Tal tesis ya la desarrollé ampliamente en el capítulo anterior y no me detendré más en ella.

controlar la reacción del objeto sobre los instrumentos de medida si éstos están sirviendo a su propósito- la necesidad de una renuncia final al ideal clásico de causalidad y a una radical revisión de nuestra actitud hacia el problema de la realidad física”¹⁰¹.

4) Esta apelación de Bohr a una *revisión de nuestra concepción sobre la realidad física* es muy importante, porque la cuestión acerca de la completud de la mecánica cuántica, planteada en los términos del argumento EPR, depende de qué es lo que entendamos por ella a la hora de describirla. Bohr sostiene que el criterio ontológico que defienden los tres autores, a pesar de sus éxitos pasados, ha dejado de ser aplicable a las nuevas teorías físicas del siglo XX, incluida la teoría general de la relatividad. Por esto, termina su artículo destacando que la renuncia a una separación de las ideas de espacio y tiempo, a la que nos lleva aquella teoría, junto con la dependencia del sistema de referencia de todas las mediciones espacio-temporales que realicemos es, asimismo, y al igual que la situación en física cuántica de inseparabilidad entre el instrumento de medida y el objeto observado, incompatible con la noción que Einstein defiende de realidad física: según Bohr las enseñanzas que nos aportan tanto la teoría de la relatividad como la teoría cuántica apuntan a una renuncia o modificación de “todas las ideas relacionadas con el *carácter absoluto* de los fenómenos físicos”¹⁰².

¹⁰¹ *Respuesta de Bohr*, p. 224.

¹⁰² “Before concluding I should still like to emphasize the bearing of the great lesson derived from general relativity theory upon the question of physical reality in the field of quantum theory. In fact, notwithstanding all characteristic differences, the situations we are concerned with in these generalizations of classical theory present striking analogies which have often been noted. Especially, the singular position of measuring instruments in the account of quantum phenomena, just discussed, appears closely analogous to the well-known necessity in relativity theory of upholding an ordinary description of all measuring processes, including a sharp distinction between space and time coordinates, although the very essence of this theory is the establishment of new physical laws, in the comprehension of which we must renounce the customary separation of space and time ideas. The dependence on the reference systems, in relativity theory, of all readings of scales and clocks may even be compared with the essentially uncontrollable exchange of momentum or energy between the objects of measurements and all instruments defining the space-time system of reference, which in quantum theory confronts us with the situation characterized by the notion of complementarity. In fact this new feature of natural philosophy means a radical revision of our attitude as regards physical reality, which may be paralleled with the fundamental modification of all ideas regarding the absolute character of physical phenomena, brought about by the general theory of relativity”. *Ibid.*, pp. 234-235.

Pero, dejando a un lado el papel que juega la relatividad en la necesidad de revisar la noción de realidad física y volviendo al carácter esencial de la física cuántica que exige tal revisión, se ha de añadir que tal hecho fue el que, además, desencadenó la crisis del lenguaje clásico, ya que, si lo usamos para describir los fenómenos cuánticos, hemos de tener en cuenta su característica de discontinuidad e individualidad, a la que me he referido más arriba, con lo cual ya no estarían *representando* una *realidad física independiente* del proceso de medida. Su función es ahora diferente: han de tener en cuenta que las propiedades físicas que están describiendo no son propiedades exclusivas del objeto, sino que también aluden al proceso de medida. Ésta es la postura de Bohr: son propiedades “fenoménicas”, en las que el objeto y el dispositivo experimental¹⁰³ se unen y se convierten en inseparables, con lo cual la “realidad objetiva”, “transfenoménica” o “interfenoménica”, ha quedado, completamente, fuera del alcance de la descripción física de los fenómenos cuánticos.

No obstante, Bohr no renuncia a la descripción objetiva, aunque en otro sentido distinto del clásico. Así como, tampoco, renuncia a comprender las propiedades fenoménicas de los sistemas atómicos como objetos reales. Pero, para que se dé esta comprensión, es necesario encontrar un vínculo conceptual entre el abstracto esquema matemático de la teoría y la descripción física, y no sólo matemática, de los procesos atómicos, esto es, una interpretación en lenguaje cualitativo del lenguaje matemático, siendo ésta la razón de ser de su filosofía de la complementariedad¹⁰⁴.

Pues bien, Bohr responde al ataque de EPR haciendo hincapié en la idea de que la realidad no se nos manifiesta de una manera autónoma: hay que partir de la experiencia y ésta nos presenta una situación nueva en física, en la que no se puede realizar una clara distinción entre el instrumento de medida y el objeto bajo observación¹⁰⁵ y, por tanto, nuestra descripción de aquélla ya no puede tener las mismas características que las que se derivaban de una descripción objetiva en sentido clásico.

¹⁰³ Preparado para medir una u otra de sus propiedades físicas, pero no ambas.

¹⁰⁴ Una vez más la discusión entre Einstein y Bohr sobre la completud de la mecánica cuántica acaba remitiendo a esta cuestión: dónde está el vínculo entre los conceptos físicos y su significado extralingüístico.

¹⁰⁵ Los operadores de la física cuántica “operan” sobre el objeto sometido a medición, de tal forma que la función ψ es un elemento indispensable de la teoría, la cual se ve, necesariamente, implicada con el proceso de observación; de ahí que el principio de superposición (de la ecuación de onda) posea un carácter irreductible dentro del esquema matemático de la mecánica cuántica.

5) Esta descripción que ofrece la física *cuántica no puede ser acusada de incompletud en base a un criterio de realidad que no tiene en cuenta la característica básica del mundo cuántico: la individualidad del cuanto de acción*. Sin ella se podría afirmar, como se hace en EPR, que el carácter estadístico de la física cuántica se debe a nuestra ignorancia y que existe una arbitraria elección a la hora de establecer los diferentes elementos de la realidad, por tanto, la descripción mecánico-cuántica es indirecta, en el sentido de no ser una *auténtica descripción* de la realidad física. Sin embargo, el postulado cuántico está ahí y Bohr refuta los argumentos de Einstein partiendo de la premisa de que esta integridad de los fenómenos cuánticos es un hecho fundamental en la naturaleza¹⁰⁶, por ello se ha de sustituir el principio epistemológico de Einstein, con el que defiende el criterio de realidad en EPR, por otro principio que sí contemple esta nueva circunstancia esencial, su doctrina del actor-espectador. Razón por la cual afirma lo siguiente:

“... no estamos tratando con una descripción incompleta caracterizada por una arbitraria elección de los diferentes elementos de la realidad física a costa de sacrificar otros elementos, sino con una discriminación racional entre procedimientos y dispositivos experimentales esencialmente diferentes, los cuales unos están preparados para un uso inambiguo de la idea de localización espacial y otros para una aplicación legítima del teorema de conservación del momento. Cualquier resto de aparente arbitrariedad concierne meramente a nuestra libertad de controlar los instrumentos de medida, característico de la misma idea de experimento. De hecho, la renuncia a cada dispositivo experimental de uno u otro de los dos aspectos de la descripción de los fenómenos físicos (...) depende, esencialmente, de la imposibilidad, en el campo de la

¹⁰⁶ “According to Bohr’s position, the classical notion of the state of a physical system would have been applicable to quantum mechanical object if the classical presupposition of the continuous change of state had produced a theory which met with predictive success as knowledge was extended into the atomic domain. (...) Thus the classical justification for regarding the theoretical representation of the isolated system as a picture of the properties of an independent reality would have been upheld. In such a world, Einstein’s criticism, based as it was on rejecting the quantum postulate, would have hit its mark. But since the classical presupposition on which this representation rested has been empirically disconformed, any use of the spatio-temporal concepts to define the state of the system as isolated from observation is understood to refer to an abstraction. Thus in Bohr’s epistemological lesson we learn that at the atomic level, as a consequence of an empirical fact, the classical spatio-temporal concepts are not defined in an unambiguous sense for an objective description of an independent physical reality”. FOLSE, H., The Philosophy of Niels Bohr, p. 166-167.

teoría cuántica, de controlar exactamente la reacción del objeto sobre los instrumentos de medida, i.e., la transferencia de momento en el caso de las mediciones de posición y el desplazamiento en el caso de mediciones sobre el momento. Justamente, en este último aspecto, cualquier comparación entre la mecánica cuántica y la mecánica estadística ordinaria (...) es esencialmente irrelevante. En verdad, en cada dispositivo experimental preparado para el estudio del fenómeno cuántico apropiado, no tratamos con una ignorancia del valor de ciertas cantidades físicas, sino con la imposibilidad de definir esas cantidades de una forma inambigua”¹⁰⁷.

6) Dado que el postulado cuántico es un hecho esencial de la naturaleza, toda la interpretación epistemológica que ofrece Bohr de la física cuántica gira en torno a él, del cual extrae el criterio racional para decidir si una descripción de la realidad física es adecuada y completa o no lo es: este criterio es el de la *inambigüedad de toda la información* en la descripción complementaria; como es natural se trata del mismo criterio con el que decidimos, dentro del marco de la complementariedad, si una descripción es o no objetiva. Desde esta exigencia de inambigüedad y partiendo de su consiguiente definición del acto de medir, Bohr refuta el criterio de realidad física propuesto por EPR, ya que contiene una ambigüedad al exigir que no se perturbe de modo alguno el sistema: en la doctrina de Bohr, el sistema no sufre ninguna perturbación mecánica, sino una interacción con los dispositivos experimentales a partir de la cual surgen las propiedades físicas de esos sistemas.

“De hecho, medir la posición de una de las partículas no puede significar más que establecer una correlación entre su comportamiento y algún instrumento rígidamente fijado al soporte que define el marco de referencia espacial. Bajo las condiciones experimentales descritas tal medida también nos proveerá con el conocimiento de la localización, de otro modo completamente desconocida, del diafragma con respecto a ese marco espacial cuando las partículas pasan a través de las rendijas. Verdaderamente, sólo de este modo obtenemos una base para las conclusiones acerca de la posición inicial de la otra partícula relativa al resto del aparato. Al permitir un esencialmente incontrolable traspaso de momento desde la partícula al soporte mencionado, no obstante, por este procedimiento nos hemos privado de cualquier posibilidad futura de aplicar la ley de conservación del momento al sistema compuesto del diafragma y las dos partículas y, por tanto, hemos perdido nuestra única

¹⁰⁷ *Respuesta de Bohr*, p. 229.

base para una aplicación inambigua de la idea de momento en las predicciones referidas al comportamiento de la segunda partícula”¹⁰⁸.

Dicho brevemente, como Bohr piensa que esta situación es inevitable, renuncia a toda discusión basada en los términos clásicos de “realidad objetiva” o “independiente” y busca la solución por otro camino; esto es lo contrario de lo que le ocurre a Einstein. Los contrargumentos de Bohr son siempre ajenos al planteamiento de Einstein, al que hace caso omiso porque piensa que la mera aparición de la física cuántica, y en concreto de h , en el panorama de la ciencia ha anulado la validez del punto de partida del realismo clásico¹⁰⁹. Ésta es la zona de influencia donde el positivismo de Bohr hace más mella dentro de la polémica entre los dos físicos: Bohr está convencido de que el simple hecho de haber construido una teoría como la mecánica cuántica tiene una gran relevancia epistemológica. A saber, la descripción de la realidad que aquella ofrece es una descripción completa y adecuada a los nuevos fenómenos y, ya que es capaz de describir la realidad, cumple el objetivo primordial de la ciencia.

Más adelante, cuando analice la base de estos argumentos, expondré el motivo por el cual Bohr parece hacer caso omiso al argumento de Einstein acerca de la violación del principio de separabilidad espacial y le responde simplemente con su interpretación epistemológica de la mecánica cuántica; de momento, sólo diré que su actitud, al responder así a la crítica de EPR, no es descabellada ni injustificada. Tiene su razón de ser así: Bohr no se tomó el problema de la inseparabilidad cuántica más que como una cuestión epistemológica y no física; por ello su respuesta siguió esta tónica.

b) El significado objetivo de las relaciones de Heisenberg

Es cierto que la crítica expuesta en el artículo EPR no hace referencia a la interpretación epistemológica de Bohr, sino que alude,

¹⁰⁸ *Ibid*, p. 231. A lo cual, añade: “Conversely, if we choose to measure the momentum of one of the particles, we lose through the uncontrollable displacement inevitable in such a measurement any possibility of deducing from the behavior of this particle the position of the diaphragm relative to the rest of the apparatus, and have thus no basis whatever for predictions regarding the location of the other particle”.

¹⁰⁹ Una vez que Bohr convenció a Einstein de esto, fue cuando inició su búsqueda en solitario de una teoría totalmente nueva que no contuviera el valor constante del cuanto de acción.

meramente, a la indeterminación de las relaciones de Heisenberg. No obstante, la respuesta de Bohr, siguiendo su filosofía de la complementariedad, está justificada desde su propio punto de vista, ya que considera que el principio de Heisenberg es la expresión cuantitativa de su propia interpretación epistemológica. Es más, el planteamiento que aparece en EPR incita a Bohr a enfocar sus discusiones con Einstein como si se tratara de una polémica entre determinismo e indeterminismo. En parte, porque interpreta que el objetivo de aquél es restaurar el determinismo, dado que en su crítica, Einstein no distingue claramente entre determinismo y realismo; pero, además, porque Bohr defiende que las relaciones de incertidumbre tienen un significado objetivo: no es algo que pertenezca a nuestro conocimiento, como dice Einstein concediéndoles un valor subjetivo, sino que forma parte esencial de la naturaleza.

Es decir, que la naturaleza esté indeterminada, en términos causales y espacio-temporales, implica que nuestro conocimiento de ella, construido a partir de estos términos, sólo se obtenga en forma de probabilidades: las probabilidades pertenecen a nuestro conocimiento; la indeterminación a la naturaleza. En este aspecto, la “teoría propensivista” de Popper está mucho más cerca de la interpretación de Bohr de lo que aquél piensa, aunque, por supuesto, también difieren en otros.

En primer lugar, Bohr tampoco acepta, al igual que Popper, que el sujeto, en tanto ser consciente y pensante, a veces llamado “sujeto gnoseológico” tenga nada que ver con el colapso de la función ψ , el responsable es el acto de observación y medición¹¹⁰, el dispositivo experimental, el también llamado “sujeto empírico”, aspecto en el que ya me detuve. Por otro lado, es la naturaleza misma de la realidad la responsable de esas probabilidades: la indeterminación esencial de la naturaleza, o dispersión, como dice Popper, es la verdadera responsable del colapso de ψ ; según el autor de esta teoría, la “reducción del paquete de ondas”, como él lo llama, es simplemente el reflejo de la “transición de lo posible a lo real” y, de esta forma, entiende las probabilidades como propensiones de los sistemas físicos a adoptar ciertos estados y las ondas son las representaciones matemáticas de estas propensiones. Es más, para

¹¹⁰ Además de las semejanzas entre ellos, que expongo en el texto principal, hay otra que señala Feyerabend en relación con el término “fenómeno”: “(...) Popper’s insistence that the experimental conditions is, in Feyerabend’s view, precisely what Bohr had in mind when he used the notion of a “phenomenon” to include the account of the whole experimental arrangement”. (Cf. JAMMER, M., The Philosophy of Quantum Mechanics, p. 450).

admitir que esta teoría propensivista sea una teoría objetiva de la probabilidad singular y no sólo una teoría de la “probabilidad objetiva frecuencial o, *puramente*, estadística”, Popper alega que las “propensiones y los campos de propensiones son tan reales como las fuerzas y los campos de fuerzas. Son, como las fuerzas, propiedades disposicionales; y como las fuerzas o lo campos de fuerzas son propiedades no tanto de las partículas como de toda la situación física; son, como las fuerzas, propiedades *relacionales*” y continúa explicando:

“Una razón de que Newton encontrase difícil aceptar su propia teoría como *explicación* de la gravedad era que le resultaba difícil ver en sus fuerzas de atracción -actuando a distancia- una propiedad *inherente o esencial* de la materia. La extensión podía ser una propiedad esencial de un trozo de materia, porque no dependía de nada más que de ese trozo de materia. Pero la atracción era una disposición a atraer a *otros trozos de materia*: era propiedad relacional, una propiedad mutua; y era, por tanto, difícil de concebir como *inherente* al trozo de materia, tan difícil como es considerar inherente la propiedad de un trozo de materia de ser *más extenso (más grande) que otro trozo de materia*. Es nuestro hábito aristotélico y esencialista de expresarnos (unido a la preferencia habitual a usar enunciados «categóricos», es decir, de sujeto-predicado) el que nos sugiere que las propiedades relacionales no son «reales» sino «ideales»; es decir, que tienen su fundamento sólo en nuestro pensamiento y en nuestras actividades de ordenación. Es esa actitud, en último término, la que lleva a la interpretación subjetiva de las probabilidades y la que hace difícil aceptar una interpretación objetiva de la propensión”¹¹¹.

Estas *probabilidades*, entendidas como *propiedades relacionales*, tienen una *existencia* parecida a las “ondas virtuales” con las que Bohr, en la teoría BKS, se refiere a su *realidad no-material*¹¹². Esta referencia a la inmaterialidad de las ondas armoniza con su propuesta de revisar la noción de “realidad”, desligándola de la acepción realista del materialismo clásico, desde la cual se la identifica con una realidad objetiva, físicamente independiente, que tiene propiedades del tipo sustancialista de la lógica

¹¹¹ Cf. POPPER, K.R., Teoría cuántica y el cisma en física, pp. 145 y 146.

¹¹² “... las «ondas virtuales» que introdujeron Bohr, Kramers y Slater, que, en palabras de Heisenberg, son «algo a medio camino entre la idea de un suceso y suceso real, una clase rara de realidad física a igual distancia de la probabilidad y de la realidad”. SELLERI, F., El debate de la teoría cuántica, p. 95. (La cita que incluye pertenece a HEISENBERG, W., Física y filosofía, Ediciones la Isla, Buenos Aires, 1959, p. 27).

aristotélica, donde tenemos un *Sujeto*, el objeto físico, y sus *Predicados*, las propiedades que le pertenecen al propio objeto.

Bohr concebía al mundo atómico constituido de tal forma que sólo podía ser descrito con la ayuda de leyes estadísticas porque, dado el carácter irreductible e intrínseco a la naturaleza del propio cuanto de acción, responsable de la incertidumbre, ésta también es inherente a la naturaleza y de ella surgen las probabilidades con las que la teoría la describe; de ahí que las propiedades no sean objetivas (del objeto), sino del fenómeno (fenoménicas), cuyas relaciones lógicas han de ser de tipo relacional: se sustituye el enfoque sustancialista de la lógica *Sp* por el de las relaciones del tipo de lógica *aRb*; de manera que sólo podemos establecer relaciones entre las propiedades fenoménicas, sin atribuirles a ningún objeto sustancialista (materialista): “relaciones no ambiguas entre los hechos de la experiencia”, dice Bohr.

Sin embargo, a pesar de estas semejanzas, hay también grandes diferencias. Una de ellas¹¹³ es que las probabilidades, según la doctrina de Bohr, aun siendo reflejo del indeterminismo esencial de la naturaleza, son exclusivas de nuestro conocimiento aunque, lo que las relaciones de Heisenberg, «como enfatizó Feyerabend, expresan no es sólo una restricción de nuestro conocimiento, sino que expresan la ausencia de un comportamiento objetivo en el mundo»¹¹⁴.

Además, Popper pretende que se puede mantener la simultaneidad de la posición y el momento, “muy aproximadamente”, bien definidos; pero, su interpretación de la “reducción del paquete de ondas”, siguiendo el experimento de la “doble rendija”, contiene el error de identificar el carácter estadístico de la física cuántica con el que cualquier otra teoría clásica estadística y, además, confunde las ondas clásicas con las ondas ψ ¹¹⁵. Ahora bien, la razón por la que Popper no distingue entre ambos tipos

¹¹³ Otra de las diferencias la he recogido del último texto que he citado de Jammer: “But complementarity, Feyerabend continued, goes beyond the propensity interpretation by talking out of the individual physical system and attributing to the experimental arrangement not only probability but also the dynamical variables of the system such as position and momentum: it thus relativizes not only probability but all dynamical magnitudes. Popper’s argument that a change in experimental conditions implies a change in probabilities does not suffice to account for the kind of changes encountered, say, in the two-slit experiment or its variations.” (Cf. JAMMER, M., The Philosophy of Quantum Mechanics, p. 450.

¹¹⁴ Cf. *Ibid*, p. 451.

¹¹⁵ Cf. POPPER, K.R., Teoría cuántica y el cisma en física, p. 140. Tal y como puede leerse en el libro de Jammer, citando la tesis de Feyerabend: “Popper’s allegation which he referred to as “the great quantum muddle” is in Feyerabend’s opinion “nothing but a piece

de teorías estadísticas, quizás esté en que éste emplea el término “probabilidad” en otro sentido distinto al de Born¹¹⁶.

En definitiva, según las ideas de Bohr se ha de admitir como cierto que las probabilidades sólo afectan a nuestro conocimiento, pero esto es así porque el mundo no es un mecanismo de relojería; todo lo contrario, el mundo está imbuido de indeterminación. Esta indeterminación es real y no subjetiva. Por ello, si la física cuántica es completa dentro de los límites del principio de Heisenberg, como reconoció Einstein, es completa en cualquier sentido; más allá de estos límites no hallamos la realidad, sino una idealización mecanicista y clásica de ésta.

Sin embargo, Einstein insiste en poder dar una descripción en términos de objetividad clásica porque no considera la situación, que acabo de esbozar, como algo irreductible; es decir, él piensa que las relaciones de incertidumbre pueden y deben ser superadas, ya que sólo tienen valor subjetivo, y, una vez hecho esto, podríamos precisar la localización espacio-temporal de cualquier sistema físico al tiempo que su estado dinámico, dado que la realidad de aquéllos es independiente del proceso de observación.

Por su parte, Bohr no define la objetividad en términos ontológicos como los de Einstein; la define desde el lenguaje y esquivando la ontología. Pero, aun así, añade a sus consideraciones, puramente epistemológicas, que ese lenguaje intersubjetivo (objetividad cuántica) no alude al objeto, pero sí al “fenómeno”, en sentido bohriano, por eso hay que incluir en la descripción objetiva las condiciones experimentales. Aún más, esa alusión al fenómeno no se hace directamente sino a través de una “analogía”¹¹⁷:

of fiction” to which Popper was led because he confused classical waves with ψ -waves and neglected the dynamics of the individual particle, being misled by his unwarranted conception that the quantum theory is pure statistics” (Cf. JAMMER, M., The Philosophy of Quantum Mechanics, p. 451).

¹¹⁶ “To Popper, the probability for an event to happen is a measure of the total number of times that the event happens (given identical circumstances each time) out of all possible events. This is called the ‘frequency interpretation’ of probability. On the other hand, Born’s view is that ‘probability’ is tied to a single event, a single particle of matter. With the frequency interpretation of probability, the chance that a coin will land heads is $\frac{1}{2}$ because half of a very large number of flippings of the coin will land heads. But in Born’s single event interpretation, the probability of the coin landing heads is $\frac{1}{2}$ because of the nature of the single coin flip -that is, the coin has only two sides, and if they are weighted equally each has the same chance for the final state of the coin”. Cf. SACHS, M., Einstein versus Bohr, p. 113.

¹¹⁷ Es decir, su referencia lingüística no es inmediata o directa; se realiza a través de un símbolo.

objetividad y contenido físico aparecen unidos de nuevo. La *descripción intuitiva analógica*, que la complementariedad asigna a la mecánica cuántica, es indirecta pero no en el sentido al que se refiere Einstein, es decir, no es superficial a causa de que se pueda dar otra descripción más profunda, más completa; es indirecta sólo en el sentido de que necesita la mediación del símbolo para representar la realidad¹¹⁸.

De lo anterior se sigue que, según Bohr, esta segunda fase en la discusión entre Einstein y él puede reducirse a si el principio de Heisenberg tiene un valor objetivo u subjetivo. Si optamos, como hizo el danés, por el significado objetivo de las relaciones de incertidumbre, entonces se ha de aceptar el indeterminismo esencial en la naturaleza que ellas implican, pero, a cambio, ofrecen la posibilidad de usar sin ambigüedades la terminología clásica en el dominio atómico y, de este modo, poder dar una descripción con contenido físico-intuitivo de los fenómenos cuánticos: si unimos el indeterminismo al contenido intuitivo, obtenemos una descripción física de los fenómenos atómicos aunque sin poder recurrir a la representación, en términos de imágenes clásicas, de los objetos como descripción directa de éstos.

Sin embargo, esta idea contradice abiertamente el criterio de realidad manejado en EPR, por ello Einstein sólo le concede un valor subjetivo: las relaciones de incertidumbre no forman parte de la realidad física, sólo se refieren al carácter estadístico de una teoría que no da una descripción completa de aquélla, ya que carece de *intuición* a la hora de representar todos los elementos de la realidad, puesto que hablar de probabilidades es dar una descripción indirecta de la realidad que carece de “objetividad” y de todo “contenido intuitivo”. Es decir, sólo la *descripción directa* es capaz de representar objetiva y espacio-temporalmente el estado físico de los fenómenos, conectando teoría y realidad; según el criterio de Einstein, una teoría ha de describir el comportamiento de los sistemas físicos como *objetos autónomos*, perfectamente localizados en el *espacio-tiempo*¹¹⁹.

¹¹⁸ Su representación no es ni pictórica, así como tampoco es mecánicamente bien definida en términos espacio-temporales, “objetual”; sino simbólica-analógica, “fenoménica”: su definición depende de la medida.

¹¹⁹ De momento no diré nada más acerca de esta cuestión porque profundizaré en ella, próximamente, cuando analice la relación entre el concepto de “intuición” y el tipo de representación que se consigue a partir de modelos espacio-temporales bien definidos, idea defendida por Einstein, frente al significado simbólico que le otorga Bohr.

La razón de todo esto es la siguiente: Einstein se resiste a concebir los objetos como fenómenos, en el sentido que le da Bohr al término, es decir, no cree que la interacción entre el objeto y los instrumentos de medida haya de ser irreductible e incontrolable. Porque el precio a pagar, siempre según Einstein, por el significado objetivo de las relaciones de indeterminación, o dicho de otra forma, por afirmar que la descripción estadística de la función de onda en términos de probabilidades es completa, son los “estados potenciales” y las “acciones fantasmas” que rompen el principio de separabilidad espacial entre los sistemas físicos. Ésta sería la ventaja a su favor: el significado subjetivo de las relaciones de indeterminación permite eludir la necesidad de admitir las “realidades potenciales” porque aceptar el valor objetivo de las relaciones de indeterminación es equivalente a afirmar que la descripción estadística, que nos ofrece la función ψ , no es una representación incompleta de lo que acontece en el mundo atómico, de modo que la incertidumbre es objetiva y esencial a la naturaleza; pero esto implica, dentro del planteamiento de Einstein, que existan los estados potenciales en torno al experimento del “gato de Schrödinger”, donde se ha de admitir que la superposición de estados implique un gato potencialmente vivo-potencialmente muerto.

Sin embargo, dentro del planteamiento de Bohr, esta superposición de estados se interpreta como algo que sólo se refiere a nuestro conocimiento de la realidad, es decir, como el resultado de haber pasado aquélla, la realidad física del objeto cuántico, por el tamiz del lenguaje cualitativo y de los aparatos macroscópicos, lo cual introduce una falacia lingüística, filtrándose la ambigüedad, que ha sido provocada por una amplificación de los efectos cuánticos en el nivel macrofísico o mesofísico, el cual obedece a las altas probabilidades que se aproximan a la unidad, se acercan imperceptiblemente a la ausencia de indeterminación, pero, en realidad, no la alcanzan nunca. De modo que tal transposición o traslación de las circunstancias cuánticas al nivel humano es ilícita por esta razón; la interpretación estadística de la Escuela de Copenhague defiende que esas “potencialidades” sólo se refieren a nuestro conocimiento y no a la realidad: en mecánica cuántica, acerca de la *realidad en sí* no se afirma absolutamente nada. Por ello, la conclusión de Bohr es que no se puede dar una descripción de la realidad física en los términos en que Einstein ha definido ese tipo de descripción a través de su criterio de realidad y de la condición de completud. La única descripción posible es aquélla que esté libre de ambigüedades, a pesar de que ésta implique una inseparabilidad entre el objeto y el instrumento de medida y que comprenda la violación de

la separabilidad espacial, pues, al fin y al cabo, para Bohr, el espacio es sólo fenoménico y no “real”.

De esta forma se ve que las dos posturas no sólo son irreconciliables sino que, además, ambas están justificadas desde dos concepciones epistemológicas diferentes: la una habla de “realidad independiente”, la otra de “realidad fenoménica”, nacida de la inseparabilidad aparato-objeto que introduce el cuanto de acción.

Por tanto, la decisión entre la postura de Einstein o la de Bohr, entre el significado subjetivo u objetivo de las relaciones de Heisenberg, no se puede tomar sin haber optado, previamente, por un punto de partida u otro; pero, aún así, se ha de tener en cuenta lo siguiente: a favor del primero está nuestro sentido común, el testimonio de la experiencia ordinaria y las teorías clásicas; pero, el segundo tiene de su parte, al menos, dos cosas. Por un lado, es la esencia de una teoría que es matemática y empíricamente consistente y, por otro lado, nos ofrece una explicación de ciertos fenómenos que, sin el principio de indeterminación, seguirían siendo un misterio, como es la emisión radioactiva de partículas α y la estabilidad de los núcleos atómicos, es decir, cómo pueden permanecer unidos dos protones dentro del núcleo si su repulsión eléctrica es fortísima. E incluso, ya no se trata sólo de explicar fenómenos, sino también de justificar principios como el de la conservación de la energía en el ámbito de la microfísica¹²⁰.

La explicación del primer fenómeno es ésta. Tenemos un núcleo radiactivo que emite partículas α , formadas por dos neutrones y dos protones. Algunas de estas partículas no tienen suficiente energía cinética para salvar la barrera de potencial eléctrico, creado por los efectos combinados de la fuerza nuclear y la fuerza eléctrica que se produce cuando una partícula alfa se aproxima al núcleo. Esta barrera, o “pozo”, las mantiene confinadas dentro del núcleo, ya que si tuvieran dicha energía cinética no estarían en el pozo, dentro de la barrera, y, sin embargo, existe una cierta probabilidad de que atraviesen esta barrera. El principio de indeterminación explica esto desde el llamado “efecto túnel”: si la anchura de la barrera potencial es del mismo orden que “la longitud de onda de de Broglie” y la incertidumbre concerniente al momento es suficientemente pequeña, tenemos que la incertidumbre de la posición es tan grande que puede ser localizada a uno u otro lado de la pared potencial. Si la partícula

¹²⁰ La prueba de la existencia de los cuantos de luz, realizada por Compton, y los experimentos de Bothe y Geiger reafirmaron la validez de los principios de conservación del impulso y de la energía, incluso en los procesos cuánticos individuales.

ya se halla fuera de la barrera, se ha de explicar su presencia desde la otra relación de Heisenberg, la incertidumbre de la energía: con respecto a una cantidad de tiempo suficientemente corto, la incertidumbre de la energía es tan grande que existe una probabilidad finita de que la energía E de la partícula pueda rebasar la altura de la pared del potencial. Así lo describe Gribbin:

“Durante un corto intervalo de tiempo, una partícula puede tomar prestada energía de la relación de incertidumbre, ganando la suficiente como para saltar la barrera de potencial antes de devolverla. Cuando retorna a su estado propio de energía ya se encuentra fuera del pozo, alejándose precipitadamente”¹²¹.

En cuanto a la explicación del segundo fenómeno mencionado, ésta depende de la indeterminación física entre el tiempo y la energía. El núcleo atómico está lleno de repulsión electromagnética, ya que los protones están muy próximos entre sí. La fuerza nuclear fuerte debe ser y es más potente que la electromagnética, aunque disminuye con la distancia mucho más rápidamente. Según la física de partículas, la partícula de intercambio responsable de esta fuerza es el pión y tiene propiedades que se derivan de la segunda formulación del principio de Heisenberg, la indeterminación del tiempo y la energía: cuanto más breve sea la existencia de esta partícula, más energía podrá poseer. El pión debe durar lo suficiente para ir y volver de un protón al inmediato, pero no mucho más para que no salga del núcleo, ya que en las regiones externas no se han percibido las fuerzas nucleares. Se puede calcular que este recorrido lo haría en unos 5×10^{-24} segundos. Si se mide la energía para un intervalo no inferior a esta cifra, se puede determinar la energía adicional, que el principio de indeterminación le cede a esta efímera partícula: $(\Delta E)(5 \times 10^{-24}) = 10^{-27}$, que es el valor aproximado de h . Si, ahora, despejamos la indeterminación de la energía, tenemos que la cantidad de energía que el principio de Heisenberg deja disponible para el pión es de 0'0002 ergios.

Definitivamente, para Bohr, la enseñanza de la física cuántica consiste en que nos ha mostrado cuáles son los límites del conocimiento físico. Estos límites son establecidos por las relaciones de incertidumbre, lo cual provoca dos tipos de reacciones opuestas ante tal situación: una actitud negativa, desde la que lamentarnos por la pérdida del determinismo y con él de la posibilidad de representarnos el mundo a través de imágenes

¹²¹ GRIBBIN, J., En busca del gato de Schrödinger, p. 112.

pictóricas (modelos espacio-temporales); o una actitud positiva, desde la que entendamos que esta circunstancia nos da la “libertad”, como lo llama Weizsäcker, de usar una descripción en la que, por ejemplo, el impulso esté determinado, pero no su posición. Gracias a esta “libertad” podemos entender el fenómeno de la radiactividad o la estabilidad del átomo y esto también es inteligibilidad de la realidad; comprensibilidad y explicación del mundo físico¹²².

Ahora bien, más arriba mencioné que el inconveniente de aceptar el valor objetivo de las relaciones de Heisenberg, que Einstein plantea, es que si la indeterminación es física y no meramente gnoseológica, se tendría que aceptar la existencia de interrelaciones físicas a distancia, “acciones fantasma”, entre sistemas espacialmente alejados y, en principio, independientes; es lo que actualmente se denomina “correlaciones EPR”: ¿es éste un inconveniente real? ¿tienen estas correlaciones existencia física en la naturaleza?

c) ¿Existen, físicamente, las correlaciones EPR?

A la hora de responder a esta pregunta, acerca de si las correlaciones EPR tienen existencia física, uno se encuentra con otra cuestión previa acerca del carácter o la naturaleza de la inseparabilidad cuántica, o no-localidad.

El físico francés, Michel Paty, reconoce dos caminos hacia el problema de la no-localidad: tanto la indiscernibilidad como la inseparabilidad de las partículas son conceptos propiamente cuánticos; el primero está implícito en el principio de exclusión de Pauli y el segundo en el formalismo de la función de onda, y ambos conducen a la propiedad no-clásica de la “no-localidad”. Ahora bien, continúa Paty, hay dos formas de enfrentarse a este problema: 1) considerarlo como un problema físico, tal y como hizo Einstein, lo cual nos arrastra hacia los mismos inconvenientes que expuse en relación con las interpretaciones realistas de la función de onda (acciones fantasmas, remontar el curso del tiempo, conexiones telepáticas, etc.); 2) verlo como un problema epistemológico, relacionado

¹²² ¿Podemos pensar en otra teoría que explique todo esto? Quizás, sí; no obstante, ¿por qué buscar otra explicación distinta, que no tenemos, cuando aún funciona una teoría tan explicativa y operativa como la mecánica cuántica? ¿Por restaurar el realismo clásico? Bien; pero, ¿tiene algún fundamento la crítica de Einstein? Más adelante analizaré su búsqueda de una teoría de variables ocultas, a través de la teoría del campo único, con el objetivo de comprobar si aquel rechazo tiene sentido en base a una crítica realista.

con la nueva concepción cuántica de la medida, que fue la postura que tomó Bohr¹²³.

La dilucidación de este dilema, para optar por una de estas dos alternativas, es prioritario a la hora de resolver la cuestión que aquí se plantea. No obstante, señalaré que la primera opción depende, directamente, de si se otorga un carácter subjetivo a las relaciones de Heisenberg y la segunda de si se asume el valor objetivo de éstas.

Si el indeterminismo cuántico tiene un valor físico u objetivo y es esencial a la naturaleza, entonces no existen, objetivamente, al margen de las observaciones, algo así como un espacio y un tiempo objetivos; si el espacio y el tiempo no son objetivos, entonces desaparecen los motivos por los cuales se podría considerar el problema de la no-localidad, o de la inseparabilidad de los sistemas, como una cuestión física. Sin embargo, y desde el punto de vista de Einstein, si el indeterminismo se refiere sólo a nuestro conocimiento y no a la realidad física, entonces el espacio y el tiempo pueden tener valores objetivos, susceptibles de ser determinados con toda precisión al margen de la observación, y, por tanto, la presunta violación del principio de separabilidad de los sistemas es, claramente, una cuestión física y no, meramente, epistemológica, cuyas aberrantes consecuencias, mencionadas más arriba (acciones “fantasma” a distancia; “comunicación telepática” entre las partículas; anomalías causales...), inclinan la balanza a favor de la localidad y, en consecuencia, contra la tesis de la completud de la física cuántica, pues no estaría describiendo físicamente, “realmente”, el mundo de los fenómenos físicos, sus “estados reales”.

No obstante, demostraré que si se concibe la inseparabilidad cuántica de las partículas como una cuestión meramente epistemológica, sin repercusiones físicas, como hizo Bohr, tales consecuencias tampoco se tendrían que aceptar, pues, de hecho, no se producirían. Por esto, en su respuesta a EPR, en lo que respecta al principio de separabilidad, que tan importante era para Einstein, no hay ninguna referencia explícita a la vertiente física de esta cuestión: únicamente, lo relaciona con el problema epistemológico de la medida en mecánica cuántica y por ello dije que comienza refutando el criterio ontológico afirmando que “la expresión «sin perturbar de ninguna manera el sistema» contiene una esencial ambigüedad. Examinaré la razón por la cual, para él, la violación de tal principio era, tan sólo, una consecuencia del llamado “problema de la observación”. A

¹²³ Cf. PATY, M., La matière dérobée. L’appropriation critique de l’objet de la physique contemporaine, pp. 220-221.

continuación, expondré las razones que esgrimieron ambos físicos para defender sus posturas acerca de si era una cuestión física o no.

Einstein lo trató como un problema físico porque dicho principio es el pilar sobre el que se levanta su criterio de realidad y el realismo espacio-temporal¹²⁴, que él defiende, ya que aquel criterio implica, por un lado, que la realidad es espacio-temporalmente representable por la teoría y, por otro lado, que sobre esta realidad se pueden construir leyes físicas causales y deterministas¹²⁵. De este modo, si el indeterminismo se refiere sólo a nuestro conocimiento y no a la realidad física, entonces el espacio-tiempo tiene valor objetivo, susceptible de ser determinado con toda precisión al margen de la observación y, por tanto, la supuesta inseparabilidad es, claramente, una cuestión física. Así pues, el realismo de Einstein está justificado por el principio de separabilidad.

Ahora bien, si tenemos dos sistemas que están cuánticamente correlacionados, o interrelacionados, hemos de saber si pueden enviarse señales y, por tanto, comunicarse entre sí. Esta posibilidad fue negada por Einstein¹²⁶, ya que contradecía el fundamento teórico de la relatividad, pues la interrelación sería instantánea y, si se mandan señales, implicaría que la comunicación es también inmediata. Estas señales tendrían que viajar a una velocidad superior a la de la luz, que supondría la violación del postulado de la velocidad constante de la luz, la constante c . Por lo cual,

¹²⁴ Se recordará que el principio de separabilidad es la propiedad que tiene todo sistema físico de mantenerse espacialmente separado de cualquier otro sistema. El *criterio ontológico* de Einstein sobre la realidad física supone la validez de este principio, ya que aquél depende de que ninguna medición efectuada en una determinada región del espacio pueda alterar en nada la realidad física de otra región, porque ambas son físicamente independientes y, por tanto, todo aquello que tiene una existencia real debe tener una localización espacio-temporal. Por esta razón, tal concepción de la realidad física, supone la espacialidad del mundo, en el que los objetos tienen una existencia autónoma (y, a su vez, implica su representabilidad lingüística, pues así es cómo se nos manifiestan). Tal criterio sobre la realidad se corresponde con la idea acerca de que los elementos básicos de la realidad tienen un carácter físico, precisamente definido en su localización espacio-temporal, los cuales son representables desde la teoría, ya que ésta contiene conceptos contruidos en base a elementos espacio-temporales.

¹²⁵ Estas implicaciones se siguen del criterio de realidad, dado que éste defiende el tipo de objetividad físicamente independiente de la observación y el realismo espacio-temporal de las propiedades físicas, como propiedades objetivas de la realidad, es decir, que le pertenecen en exclusiva a ella.

¹²⁶ Además, no se ha conseguido realizar ningún experimento donde se detectara el envío de estas señales *físicas* superlumínicas.

para Einstein es inadmisibles que se envíen señales superlumínicas: “*La luz es el mensajero más rápido del Universo*”.

Es posible que Bohr, al principio, no se percatara de esta implicación, por ello al final de su respuesta a EPR menciona los cambios que la relatividad ya había introducido en la noción de realidad física, entre los que incluye la no-simultaneidad de dos sucesos e incluso, también, acudió a la relatividad general para refutar el experimento del “fotón en la caja”; sin embargo, Popper se equivoca cuando afirma lo siguiente:

“Si Bohr se hubiera encontrado ante resultados teóricos que sugirieran que la teoría cuántica entrañaba el abandono de la localidad, lo hubiera considerado un argumento de extraordinaria fuerza en contra de la teoría cuántica, y quizá incluso lo hubiera considerado una refutación de la teoría”¹²⁷.

Es ciertamente posible, como Popper declara continuando la cita anterior, que “a parte de Einstein en su artículo de *Dialectica*, nadie sospechó, antes de Bell, que la propia mecánica cuántica (y quizá no sólo la interpretación de Copenhague) está en conflicto con la localidad y, por tanto, con la relatividad especial”. Pero, a mi juicio, la confianza de Bohr en el formalismo de la mecánica cuántica era tal que hubiese estado dispuesto a renunciar a dicho postulado, como así atestiguan estas palabras suyas:

“(…) Einstein me expresó, sin embargo, en una conversación ulterior, el sentimiento de inquietud que experimentaba ante la aparente falta de principios firmemente establecidos para la explicación de la Naturaleza y sobre los cuales todos pudieran estar de acuerdo. Desde mi punto de vista, solo pude responder que, al enfrentarse con la tarea de poner orden en un campo de experiencia enteramente nuevo, apenas era posible confiar en ninguno de los principios habituales, cualquiera que fuera su generalidad; solo subsiste la exigencia de evitar contradicciones lógicas, y en este aspecto, el formalismo matemático de la mecánica cuántica es por entero satisfactorio”¹²⁸.

Sin embargo, mantengo que lo esencial de esta confrontación con Einstein es que Bohr no tuvo la necesidad de renunciar a él de forma

¹²⁷ POPPER, K.R., *Teoría cuántica y el cisma en Física*, p. 43.

¹²⁸ BOHR, N., “Discusión con Einstein sobre problemas epistemológicos de la física atómica” (1949), p. 69. En: *Física atómica y conocimiento humano*, pp. 40-82.

expresa, como un principio físico, pues su manera de contextualizar el problema de la no-localidad es meramente epistemológica; lo cual le sustrae de tratar la inseparabilidad cuántica como una cuestión física, pero también le niega este rango a la localidad, es decir a la espacialidad de los sistemas físicos.

Las razones de Bohr para verlo como una cuestión epistemológica y no física son, esencialmente, dos: en primer lugar, el principio de separabilidad espacial pone en juego términos clásicos, como es la espacialidad, en tanto marco objetivo donde se inscriben los fenómenos, donde se localizan los sistemas físicos, y, para él, tales conceptos descriptivos son sólo aproximaciones a la realidad; son abstracciones. Por lo tanto, es en este nivel, en el conceptual, el del lenguaje físico, donde se ha de plantear y solucionar el problema del principio de separabilidad espacial.

Pero, además, Bohr siempre defendió que la interpretación epistemológica, adecuada a esta microfísica, ha de conceder un valor objetivo a las relaciones de incertidumbre y, en tanto que el indeterminismo sí forma parte de la naturaleza, se ha de admitir que *la realidad está causalmente indeterminada en términos espacio-temporales*; de esta indeterminación se sigue que el uso de los términos clásicos ha de modificarse, ya que aquéllos se definen espacio-temporalmente y, sin embargo, los conceptos espacio-temporales no pertenecen, en exclusiva, a la realidad autónoma como algo físicamente independiente del contexto experimental. No obstante, gracias al principio de correspondencia, se hace posible mantener el soporte conceptual, que dichos conceptos clásicos poseen, siempre y cuando se admita que su validez, ahora, no depende de ninguna “representación objetiva” de la realidad, sino de una dependencia asintótica de los conceptos con ésta, y conforme a nuestra experiencia ordinaria, a la que se aproximan pero nunca llegan a representar tal cual es, mediante propiedades objetivas, sino de una manera “simbólica”¹²⁹.

Dado este dilema acerca de la existencia real, física, de las correlaciones EPR, ¿es posible encontrar una prueba experimental que nos incline hacia una u otra postura acerca de esta cuestión? ¿podría ser esta

¹²⁹ El motivo de tener que recurrir a este uso analógico se debe a su tesis sobre la imprescindibilidad de las nociones clásicas; pero, como ya he dicho en otras ocasiones, son imprescindibles porque aluden a nuestra forma de percibir el mundo y, tanto la terminología clásica como nuestra experiencia ordinaria, se basan en la representación espacio-temporal. Por ello, Bohr necesita que la complementariedad ofrezca un tipo de modelo espacio-temporal de los fenómenos cuánticos, aunque sea simbólico y sin que se trate de una representación objetiva y ostensiva de la realidad física.

prueba la existencia de señales física superlumínicas entre los sistemas correlacionados? Es decir, ¿si no existieran señales más rápidas que la luz, instantáneas, entre dichos sistemas, que los mantuvieran comunicados entre sí a distancia, esto probaría que la mecánica cuántica es una teoría incompleta? No, porque sólo lo probaría en el caso de que se partiera de la inseparabilidad como un hecho físico; si, por el contrario, la inseparabilidad no fuera física, sino epistemológica, entonces la inexistencia de dichas señales también se podría contemplar como la prueba de esta postura, es decir, que es una cuestión epistemológica y no física, lo cual avalaría la tesis de Bohr, desde la que puede seguir manteniendo que la mecánica cuántica es completa. La explicación es la siguiente.

La *no-localidad* viene de la *inseparabilidad* entre los sistemas (correlaciones EPR), como para Einstein dicha inseparabilidad sería *una cuestión física*, porque, según el realismo clásico implícito en su criterio de realidad las propiedades son objetivas e *independientes* de la medición-observación (realidad independiente), habría *dos opciones*: una, que *no existieran señales superlumínicas* sería la *prueba física* de que *la mecánica cuántica* es una teoría *incompleta*; o bien, si, de hecho, se dieran *señales superlumínicas*, entre los sistemas espacialmente separados, entonces, esto entraría en *contradicción con la Relatividad*, porque habría una violación de *c*, como velocidad límite y constante de la luz, la cual si es mantenida junto con el hecho físico de señales superlumínicas, supondría hablar de ellas como *acciones ("fantasmas") a distancia, comunicación telepática, anomalías causales, acción instantánea*, etc.; consecuencias inadmisibles para la Física, con lo cual, se volvería a la conclusión anterior: la incompletud de la mecánica cuántica.

Por el contrario, como para Bohr la *inseparabilidad* es sólo una *cuestión epistemológica*, porque, según su teoría de la medición cuántica, las *propiedades* son *fenoménicas* y no se refieren a una realidad física independiente de la observación, entonces *no puede haber señales físicas superlumínicas*, (como también sostiene Einstein), pues la inseparabilidad no es física, no tiene el rango de realidad física, lo cual le permite mantener que *la mecánica cuántica es completa* (a diferencia de la conclusión de Einstein).

En conclusión, si los sistemas correlacionados, relaciones EPR, no se envían señales entre ellos, si no existen las señales superlumínicas, podemos considerar este hecho como un elemento, u otro dato más, de apoyo a la postura que mantuvo Bohr respecto al principio de separabilidad: su violación, por parte de la física cuántica, no tiene implicaciones físicas (ontológicas, reales); sólo epistemológicas. La

violación de la localidad (de la espacialidad) no tiene el rango de problema físico.

Adviértase que la postura de Bohr continúa siendo tan coherente con la complementariedad y el formalismo matemático de la física cuántica, como en relación con el resto de las cuestiones que se han planteado hasta ahora, porque si indagamos en las profundidades de la inseparabilidad cuántica, sale a la superficie aquello que la determina como cuestión epistemológica irrenunciable. Siguiendo el siguiente análisis se puede llegar hasta la causa última de la violación del principio de separabilidad: la *constante h* es la responsable de la *superposición de estados cuánticos* (ecuación de Schrödinger); esta superposición de estados provoca la *inseparabilidad objeto-aparato* e impiden la “individualidad” de los sistemas físicos (individualidad en el sentido, de independencia, autonomía, objetividad clásica); por último, dicha inseparabilidad, o falta de independencia del sistema observado respecto de su observación, es la causante de la *violación del postulado de localidad*, o separabilidad espacial entre los sistemas, pero, también lo es del carácter fenoménico de las propiedades mecánicas de los sistemas físicos, hecho que vincula este problema con la noción cuántica de “observación”. Esta encadenación de causas obligan a admitir que la violación del principio de separabilidad es de naturaleza epistemológica y consecuencia inevitable del cuanto de acción.

En definitiva, en sus discusiones con Bohr, Einstein tergiversó las ideas del físico danés; mientras que éste, en su respuesta al artículo EPR, no otorgó al problema de la inseparabilidad espacial de los sistemas atómicos el rango de un problema físico sino, meramente, epistemológico, relacionado con la nueva teoría de la medida que se ha de mantener en física cuántica. Pues, para él, se trataba, meramente, de una consecuencia del llamado “problema de la observación”; con este enfoque, Bohr se resiste a salir de un planteamiento positivista y fenomenista, pero sólo a la hora de examinar *este problema concreto* de la inseparabilidad cuántica, al que Einstein dio tanta relevancia.

El motivo por el cual tanto insistió en esta cuestión, es que de él partió para determinar el contenido físico de una teoría, esto es, si contenía los elementos objetivos, espacio-temporales, necesarios para describir físicamente la realidad; por ello, Einstein lo planteó como un problema físico, ya que, para él, el marco espacio-temporal no es fenoménico sino real, en todo su sentido.

En cambio, Bohr pensaba que aquél se oponía a otorgar un valor objetivo al principio de Heisenberg a causa del indeterminismo que

introducía en la capacidad de predicción de la física y esto sólo es verdad en parte, porque para el físico alemán, el indeterminismo físico era un inconveniente, por supuesto, pero sólo era una implicación o consecuencia derivada de la cuestión fundamental: la espacialidad objetiva y “real” del mundo físico, como requisito para la completud de una teoría física; cuestión que está relacionada con la conexión de la teoría con la realidad, el contenido físico o *intuitivo* de los conceptos teóricos porque si bien es la base de la condición de completud, también lo es acerca de este tipo de contenido por parte de las teorías realistas con que la física describe el mundo objetivo.

Por lo tanto, este enfrentamiento de ambos sobre el valor físico o epistemológico de la inseparabilidad cuántica, está en estrecha relación con el problema del realismo, lo cual lleva a otra cuestión: ¿cuál de los dos métodos, el realismo espacio-temporal de Einstein o el fenomenismo espacio-temporal de Bohr, con su consiguiente simbolismo conceptual, es el adecuado para garantizar que una teoría tenga conexión con la realidad (contenido intuitivo)?.

Dado que es el materialismo del realismo científico, la objetividad clásica y la espacialidad física lo que está sobre el tapete de la duda y la discusión, también lo está, y en consecuencia, el contenido físico, o intuitivo de las teorías científicas.

A lo largo del siguiente capítulo daré las razones de esto, argumentando por qué es así; pero, de momento, aquello que me interesa resaltar es que Bohr aún apela a una solución de corte fenomenista para salvar este problema de la inseparabilidad cuántica de los sistemas interrelacionados y del envío de señales superlumínicas entre ellos. Pues, para poder considerar la inseparabilidad como problema epistemológico, se ha de defender el fenomenismo espacio-temporal; frente al realismo espacio-temporal, que aún podría mantenerse, si la consideramos una cuestión física al tiempo que la negamos.

No obstante, Bohr rechaza la etiqueta de fenomenista y niega la acusación de Einstein de no ser un físico realista, para lo cual traslada el criterio de realidad de una teoría fuera del realismo espacio-temporal: él propone al objeto físico como el sustrato sobre el que se levanta nuestro conocimiento científico sobre la realidad natural; pero este pronunciamiento de Bohr sólo fue planteado como un postulado, al que se aferró *comprometiéndose ontológicamente* con el contenido teórico y el significado extralingüístico de la descripción mecánico-cuántica sobre la realidad.

d) El compromiso ontológico de Bohr: una vía abierta al realismo de la física cuántica

Bohr siempre escribió, claramente, que la física cuántica, a nivel atómico, nos obligaba a abandonar los ideales clásicos, en la descripción física del mundo: el ideal determinista, el ideal de objetividad clásica y el ideal del representacionismo pictórico de los conceptos físicos. Por tanto, todos estos “sacrificios”, o renunciaciones, deben tener un fin y éste es conservar *algo* del contenido intuitivo del marco conceptual clásico.

Ese *algo del contenido intuitivo* ya implica que Bohr no era un instrumentalista, puesto que su búsqueda de este contenido supone una apuesta semántica sobre el lenguaje físico que conlleva un compromiso ontológico, tal y como apunté en el apartado 4.3, al establecer una conexión entre los elementos de la teoría (conceptos) y los elementos de la realidad (objetos); para ello decidió no renunciar a los conceptos físicos y cambiar el uso y el significado clásico de éstos (representación pictórica en el espacio y el tiempo) por otros (simbólicos y analógicos).

Ahora bien, dadas las circunstancias del entorno cuántico, para lograr esto se necesita buscar, como Bohr hizo, otro modelo distinto al clásico de inteligibilidad científica que garantice la conexión entre la *teoría* (cuántica) y la *realidad* (microfísica); éste es el último aspecto de su postura que analizaré algo más adelante. En este apartado me centraré en ese segundo elemento de su realismo, que ya he mencionado: el compromiso ontológico de la complementariedad.

Dado tal compromiso con la realidad de los objetos cuánticos, definiendo, como indudable, que su insistencia en buscar este otro tipo de conexión entre teoría y realidad ya es un indicio de que su planteamiento es realista; si bien es cierto que Bohr nunca se adentró en especificar este tipo de realismo, que él sólo postula, aquello que sí hizo fue distinguirlo del realismo clásico, donde se le vincula a la noción de “realidad física independiente (de la observación)”.

En definitiva, las razones que tengo para verle como un pensador realista son fundamentalmente tres: primeramente, planteó un nuevo tipo de conexión entre los conceptos teóricos y los sistemas físicos, que aquéllos describen; en segundo lugar, defendió un modelo de inteligibilidad (y, en un determinado sentido, de “representabilidad”) distinto del que partía la física clásica y, por último, también propuso, explícitamente, que se revisara la noción de “realidad física”.

Por otra parte, también es cierto que el punto de partida de Bohr es fenomenista (u observacionalista), tal y como expuse en el capítulo cuarto; pero él intentó, la cuestión es si con acierto o no, salir de este planteamiento y propuso un realismo (no vinculado a la objetividad clásica), porque sin un sustrato realista (que, ciertamente, según él, le está vetado a la Ciencia, como objeto de su estudio), la filosofía de la “complementariedad” no tendría sentido: basta con que los fenómenos sean excluyentes para eliminar las ambigüedades epistemológicas, que introdujo la física cuántica. ¿Por qué hacerlos, además, fenómenos complementarios? ¿Qué pueden complementar si no es al *objeto cuántico*? Dice Bohr: «*La descripción complementaria es aquella que agota toda la información sobre los sistemas físicos*» y esto implica un compromiso ontológico, por el que no se preocuparía ningún instrumentalista ni fenomenista.

Sin duda, su manera de describir la realidad es novedosa y diferente a la del marco clásico; ahora bien, cómo consiga esto es el tema central de la discusión. Según Bohr, nuestra tarea es comprender cómo la realiza, siendo ésta, precisamente, la enseñanza que nos revela la filosofía de la complementariedad: recordaré que el segundo elemento de la “lección epistemológica” de Bohr alude al tipo de contenido intuitivo que conserva la física cuántica, aunque, a cambio de recuperar éste, tuvo que renunciar a la objetividad clásica y con ella al realismo tradicional. La *nueva objetividad*, que Bohr propone, se ha de definir desde el lenguaje y no a partir de la realidad. No obstante, en la complementariedad existe una apelación ontológica a la realidad como soporte del lenguaje físico con el objetivo de conservar algo de su significado extralingüístico, tal y como argumenté al final del apartado 4.3, cuando expuse la tesis semántica de Bohr¹³⁰.

Todos los puntos anteriores justifican la tesis que defiendo: la complementariedad traza un camino hacia el realismo de la física cuántica en la medida en que Bohr se compromete ontológicamente con el valor semántico extralingüístico de los términos descriptivos que emplea dicha teoría; aunque no va más allá de este compromiso, postulado más que justificado.

Un esbozo de tales argumentos, que defienden la postura realista de Bohr, frente al instrumentalismo, es ofrecida por Weizsäcker, quien se

¹³⁰ Véase tal epígrafe y las citas de Bohr recogidas en él.

declara seguidor de Bohr y expone dos puntos importantes en el pensamiento de éste¹³¹:

Primero, si Bohr no fuera un pensador realista no propondría como *necesaria* una revisión del concepto de realidad. Bohr rechaza el concepto de realidad independiente, pero también dice *no al positivismo*, a favor de un tipo de realismo matizado, gobernado por la doctrina del actor-espectador.

Segundo, si el marco de la complementariedad fuera de corte positivista y fenomenista, Bohr aceptaría la acepción positivista del vocablo “fenómeno”, en tanto “sensación de los sentidos”; pero, no es así. El fenómeno también hace referencia a las “cosas percibidas”, es decir, a los *objetos*.

Por otro lado, Weizsäcker argumenta, además, que la modificación del concepto de realidad, en la que se da una inseparabilidad sujeto-objeto, proviene del reconocimiento del concepto de “objeto”, cuyo uso queda limitado, pero no abolido. De ahí que la doctrina de Bohr coincida con el positivismo de Mach *sólo* en su rechazo hacia “el dogma ingenuamente realista, sin adherirse por ello, sin embargo, a un dogma contrario”¹³².

Por ello, la enseñanza de la física cuántica consiste en que nos ha mostrado cuáles son los límites del conocimiento físico. Estos límites los establecen las relaciones de indeterminación, en el sentido de que podemos tomarnos esta situación de dos maneras: una actitud negativa, donde nos lamentamos de la pérdida del determinismo y con él de la posibilidad de representarnos el mundo a través de imágenes pictóricas (modelos espacio-temporales); o una actitud positiva, como la de Weizsäcker, quien afirma que esta situación nos da la *libertad* de usar una descripción en la que el impulso esté determinado, pero no su posición, y viceversa¹³³.

Gracias a esta “libertad” pueden entenderse, tal y como ya expliqué, fenómenos como la emisión radiactiva de partículas alfa o la estabilidad del núcleo atómico, lo cual ya implica una inteligibilidad de la realidad, del mundo físico. Además, si el principio de indeterminación es la única explicación actual de tales fenómenos, esto conlleva un aval a favor de su valor físico o realidad objetiva, tal y como desarrollaré; pero aquello que aquí me interesa de este asunto es que el reconocimiento del indeterminismo físico u objetivo, por parte de Heisenberg y Bohr, conlleva

¹³¹ WEIZSÄCKER, C.F. von: *Einstein y Bohr. El debate en torno al concepto de realidad propio del físico*. En: *La imagen física del mundo*, p. 208.

¹³² *Ibid*, p. 210.

¹³³ *Ibid*, pp. 209-210.

una afirmación ontológica: acerca de la realidad física se puede decir que ésta, la naturaleza, es indeterminista; éste es un indicio más a favor del realismo en Bohr. A continuación se desarrollarán estas dos ideas y me detendré en otras que considero tan importantes como las que expone Weizsäcker.

Una vez que el nuevo marco mantiene distanciadas las nociones de “objetividad” y “realidad física independiente”, de la renuncia que haga Bohr a la descripción objetiva en sentido clásico no se seguirá la renuncia a la noción de “realidad independiente” en sí misma, sino únicamente en cuanto vinculada a lo que se espera de una descripción objetiva de la Naturaleza. Sólo en este punto es dónde Bohr se presta a defender el fenomenismo, aunque no se queda en él, porque, si bien la realidad independiente no puede ser “representada” por nuestros conceptos descriptivos, pues éstos sólo pueden describir fenómenos, sí puede ser “inferida” o postulada como condición de sentido para la complementariedad, dado que, si no existe un objeto “real” al que puedan ser referidos los atributos fenoménicos de estado, no tiene sentido decir que son complementarios, pues la ambigüedad desaparece al considerarlos simplemente fenómenos diferentes¹³⁴.

“Consecuentemente, la «objetividad» asegurada por el uso inambiguo de los términos clásicos para describir los fenómenos es una propiedad de las *descripciones*, no de algo que se extiende por debajo del mundo fenoménico. La complementariedad mantiene la defensa de su objetividad desde esta reivindicación antes que desde una adherencia dogmática a la ontología tradicional de las sustancias y de sus propiedades. Por esta razón, la cuestión de la existencia de un «mundo externo» es irrelevante para la objetividad y por esto nunca es considerado explícitamente por Bohr. No obstante, la creencia de que las teorías científicas son informativas acerca de una realidad física que existe independientemente la cual produce los fenómenos experimentados es un presupuesto de la ciencia natural que difícilmente Bohr pretendió desafiar. Es este presupuesto el que da razón del intento de formular marcos teóricos cada vez más adecuados para la descripción objetiva de los fenómenos”¹³⁵.

¹³⁴ Por tanto, Bohr postula un cierto realismo, en cuyas características o consecuencias ontológicas de la propia generalización del marco conceptual no entraré ahora a discutir, pero sí es importante, para entender el sentido que Bohr ofrece de la complementariedad, dejar constancia del hecho de que su postura no era la de un instrumentalista. Cf. FOLSE, H., The Philosophy of Niels Bohr, pp. 20-21.

¹³⁵ *Ibid*, p. 242.

En consecuencia, si bien es cierto que uno de los sentidos que Bohr le da a la noción de objetividad es el de “intersubjetividad”, también alude a una cierta posibilidad de referirse a las propiedades de los objetos, en tanto que tales propiedades no surgen meramente como creación del proceso de observación. Aunque Bohr se opuso firmemente a hablar de objetividad como aquello que hace referencia a las propiedades del objeto tal cual es, al margen de toda interacción con el acto de medida, también se resistió a conceder un papel exclusivo al sujeto empírico, esto es, al proceso de observación en sí mismo, en la creación de las propiedades. Las propiedades no sólo aparecen con la medición, sino de la conjunción del objeto con el instrumento que las mide, por consiguiente, si bien no tiene sentido extrapolar estas propiedades al objeto al margen de la observación, tampoco quiere decir que el objeto no tenga nada que ver con que ellas aparezcan tras su pertinente medición.

Del mismo modo que Bohr no quiso hablar de “perturbación observacional”, la cual hace referencia a una pre-existencia de las propiedades antes de ser observadas, y prefirió el término “interacción”, tampoco defendió una postura subjetivista del problema de la medición: el papel del sujeto es la de interactuar con el objeto a través de los instrumentos de medida, pero no el “crear” estas propiedades a partir únicamente de estos instrumentos, pues todo proceso de observación ha de hacer referencia a un objeto¹³⁶. El sujeto ya no sólo es espectador también es actor, pero esta actuación no le redime de seguir siendo espectador de algo y no sólo “constructor”, y ese “algo” son los objetos aunque nunca se nos muestren tal cual son.

Por tanto, la validez de la objetividad ya no descansa sólo en ellos¹³⁷, también hay que tener en cuenta, por un lado, toda la situación experimental¹³⁸, como requerimiento de la noción de observación, y, por otro, el marco conceptual, como requieren las condiciones para la comunicación inambigua¹³⁹.

¹³⁶ Cf. BOHR, N., “Discusión con Einstein sobre problemas epistemológicos de la física atómica” (1949), en: Física atómica y conocimiento humano, pp. 78-79.

¹³⁷ En realidad no descansa absolutamente en ellos si nos empeñamos en seguir tratándolos clásicamente como independientes del sujeto empírico, es decir, independientes del proceso de observación y medición.

¹³⁸ En la que la descripción completa de todo el dispositivo es fundamental, así como también lo es la presencia del objeto.

¹³⁹ Cf. HONNER, J., The description of nature, pp. 65-68.

En este sentido se puede volver a afirmar que la objetividad cuántica es una generalización de la clásica, como lo es la noción de observación sobre la que se apoya, pues la noción clásica se revela como una idealización en la que no se tiene en cuenta el papel fundamental del experimentador, que sí incorpora la noción cuántica en el marco de la complementariedad por vincular inseparablemente el instrumento al objeto de la medición, ampliando el significado del término “objetivo”, que ahora es aplicable al dominio clásico y al cuántico. En esta ampliación de la objetividad clásica, el lenguaje tiene un papel principal, en tanto que la condición que ha de cumplir el nuevo tipo de descripción objetiva es la de proporcionar una información inambigua de los resultados de la observación; y una descripción inambigua por medio de los conceptos clásicos es una descripción con contenido físico.

Por ello, coincido con Weizsäcker cuando afirma que si Bohr no fuera un pensador realista no propondría como necesaria esta revisión porque, si bien las propiedades que medimos, con las que trabaja el científico, no son reales sino fenoménicas, sí son reales los objetos a los que aluden dichas propiedades. Además, el “fenómeno” de Bohr mantiene una cierta relación con el objeto, tal y como impone su tesis semántica, y esta circunstancia implica que su *fenomenismo* tampoco se identifica con el idealismo de Berkeley, de forma que no es adecuado catalogar esta polémica, como hace Hans Naumann, como una oposición entre materialismo e idealismo. Más eficaces pueden ser las posturas de Kouznetsov o de Bohm y Schumacher, quienes defienden que el origen de la controversia se debe a las diferencias conceptuales entre la relatividad y la física cuántica¹⁴⁰.

Por otro lado, Weizsäcker, tal y como escribe en las mismas páginas del artículo citado, piensa que la controversia entre Einstein y Bohr se debe a un malentendido por parte de Einstein. En este punto no estoy del todo de acuerdo con Weizsäcker: Einstein entendió a Bohr, pero no pudo aceptar su propuesta realista porque el compromiso ontológico que tomó éste lo realizó desde un punto de partida fenomenista; fue Bohr, quizás, quien no entendió a Einstein, ya que este último lo que le exigía al físico danés era una justificación de su postura, algo que él mismo había

¹⁴⁰ Cf. JAMMER, M., The Philosophy of Quantum Mechanics, p. 156). No obstante, si uno quiere analizar esta polémica desde sus diferencias físicas, la visión de Sachs es aún más exacta cuando plantea la dicotomía entre continuidad y discontinuidad: SACHS, M., Einstein versus Bohr, pp. 233-259.

hecho con la suya. O Bohr no le entendió, o pensó que no podía ofrecerle lo que pedía.

El motivo por el cual Einstein no pudo aceptar el “salto” de Bohr del fenomenismo al realismo es el siguiente: piensa que la causa de que el espacio-tiempo tenga propiedades métricas, físicas, que se nos aparecen en los fenómenos, es que tras ellas está la realidad objetiva (transfenoménica) del espacio-tiempo como región física de la realidad. Bohr, en cambio, admite que espacio-tiempo sean propiedades métricas, desde luego, pero exclusivamente fenoménicas: nada hay, tras su carácter fenoménico, que sea de interés para la ciencia; su uso queda restringido al registro de observaciones. Aunque con ello niegue la posibilidad de situar los fenómenos cuánticos en un espacio físico (y no sólo matemático) y, por tanto, de hacer geometría del mundo atómico; esta idea la desarrollaré en el análisis del capítulo séptimo.

Un marco espacio-temporal real, puramente objetual, queda fuera del alcance de la física; éste no es el objeto de estudio de la ciencia, aunque Bohr no niega su existencia. Es más, necesita postularlo para que sostenga al mundo fenoménico, objeto de estudio de la investigación científica. De este modo, se puede afirmar que Einstein defiende una ontología realista al estilo de la física clásica, en cuanto a las propiedades espacio-temporales; pero Bohr no se pronuncia por ningún aspecto ontológico, ya que esto le parece que sería transgredir el fenómeno.

Más atrás dije que Bohr no entendió, o tergiversó, la verdadera objeción de Einstein y convirtió la polémica con éste en una discusión sobre determinismo-indeterminismo. Ahora se ve que Einstein tampoco aceptó el esfuerzo de Bohr por salir del positivismo, con el que se ayudó a la hora de dar una interpretación epistemológica coherente de la física cuántica, ofreciendo de esta polémica una versión realista-fenomenista. Por todo esto, Bohr responde a las objeciones realistas de Einstein con argumentos relacionados con la cuestión del indeterminismo; mientras que Einstein formula sus réplicas contra un fenomenismo con el que Bohr no se identifica plenamente.

En pocas palabras, la diferencia entre Bohr y Einstein es que este último no acepta las implicaciones epistemológicas de la mecánica cuántica y parte de una idea racionalista de cómo ha de ser la realidad para elaborar desde ella el modelo epistemológico de cómo ha de ser la descripción física que la teoría nos ofrece acerca del mundo; en este sentido es por lo que

afirmo que el planteamiento de Einstein es más ontológico que epistemológico¹⁴¹.

En cambio, el danés realiza el mismo camino tomando la dirección contraria: él cree definitivamente en la validez de la teoría cuántica y acepta todas sus implicaciones, por tanto, la descripción que ésta nos da de la realidad se adecua correctamente a los fenómenos físicos. Es decir, es la teoría física la que nos informa sobre cómo ha de ser la nueva descripción de la realidad y a partir de ésta podemos definir algunos rasgos que caracterizan a esa realidad, sobre todo aquéllos que determinan el tipo de descripción física que es posible elaborar.

De todo esto, se puede concluir que, si se plantea la polémica como un debate entre realismo y fenomenismo, no se dará nunca con el tema fundamental sobre el que están discutiendo, ya que Bohr propone una revisión del concepto de “realidad” y no una supresión de éste. A no ser que redefinamos el término “fenomenismo”, no como un programa opuesto al realismo, sino como una variedad de realismo diferente al materialismo clásico.

En este sentido, Abraham Pais explica la polémica Einstein-Bohr como un debate entre realidad objetiva y complementariedad; una calificación fiel, aunque imprecisa en lo referente a la intervención de Bohr, porque oculta el carácter objetivo y realista de su propuesta¹⁴².

En pocas palabras, el físico de la relatividad considera incompleta a la mecánica cuántica porque su carácter estadístico indica que sólo es una descripción indirecta, ya que carece de conexión con la realidad: es una teoría sin contenido intuitivo. El “puente” entre teoría y realidad para Einstein es de naturaleza física y ha de estar regido por el postulado de localidad.

En cambio, Bohr defiende que la mecánica cuántica *sí* es completa porque *sí* tiene conexión, contenido intuitivo; sólo que esta conexión es indirecta, en el sentido de ser analógica y simbólica. Para Bohr, el “puente” es sólo metodológico: se realiza a través del principio de correspondencia; no tiene una base física (ni gnoseológica). Únicamente es postulado por él, dentro del marco de la complementariedad, desde su compromiso ontológico; pero éste es un supuesto al que Einstein no se adhiere porque el físico danés no da para ello ninguna razón, salvo que sin

¹⁴¹ Merleau-Ponty lo califica de “spinozista”.

¹⁴² Cf. PAIS, A., El Señor es sutil... La ciencia y la vida de Albert Einstein, pp. 24 y 442-458.

él la mecánica cuántica no tendría contenido intuitivo, y sin él carecería de conexión con la realidad.

Para Einstein, esta actitud de Bohr supone una petición de principio, que sólo es postulada como condición de sentido de aquello sobre lo que Einstein pide, precisamente, una demostración. Y esto es sobre lo que discuten.

Mi siguiente paso es exponer la alternativa de Einstein a la física cuántica porque a partir de ella se nos manifiesta la importancia que tiene el problema del contenido intuitivo en esta polémica, tal y como Einstein lo vio. Además, su concepción sobre la base intuitiva de los conceptos físicos precisa de muchas matizaciones, con las que únicamente se entra en contacto cuando nos adentramos en su “credo epistemológico” y en su “programa” para la Física.

En esta propuesta suya está contenida su peculiar concepción de espacio-tiempo, como condición de realidad para que una teoría posea elementos objetivos y ofrezca una descripción física, “directa”, del mundo físico y de los objetos y, por tanto, sea una teoría completa¹⁴³.

¹⁴³ Como ya he dicho en otras ocasiones, en el próximo capítulo mostraré que tal exigencia, para la completud de una teoría, implica que la Polémica Einstein-Bohr es un debate acerca del contenido intuitivo de las teorías físicas, cuya perspectiva es la única capaz de aportar sentido a dicha polémica, ofreciendo una solución al dilema entre ambos físicos.

5.3) *Alternativa de Einstein a la Mecánica Cuántica: 1936-1955*

La polémica entre Einstein y Bohr, en torno a la física cuántica, se mantuvo viva desde 1927, el año en que ésta se presentó como una teoría completa y acabada, hasta la muerte de Einstein en 1955. A partir de 1935, Einstein se esforzó en ofrecer una alternativa física y epistemológica a la mecánica cuántica, cambiando, de nuevo, la actitud de su crítica hacia aquélla, aunque sólo se trató de un ligero cambio de enfoque, como ya había hecho antes entre las Conferencias Solvay y el artículo EPR.

La respuesta de Bohr, a dicho artículo, no sólo le convenció de que la discontinuidad de h y el “principio de superposición” de la ecuación de Schrödinger son inherentes al carácter indeterminista y estadístico del formalismo matemático de la física cuántica, también le influyó a la hora de fortalecer y matizar la postura epistemológica, que defendió contra Bohr, y que le condujo a la búsqueda, a la que se dedicó exclusivamente durante los últimos veinte años de su vida, de una nueva teoría física que sustituyera a la actual¹⁴⁵, ya que siempre consideró a la física cuántica como una teoría fenomenista que no describía la realidad física.

Mi objetivo, ahora, es analizar cómo Einstein fundamenta su realismo en una concepción de espacio-tiempo objetivo y continuo, el cual, aun no siendo de características euclídeas, pretende respetar el principio de separabilidad espacial, pues partió de este principio como condición de realidad, del sentido físico, de una teoría. Einstein pudo haber considerado que la validez teórica y experimental de dicho principio eran suficiente aval y, por tanto, pudo, únicamente, haberlo postulado. Sin embargo, fue más allá y desarrolló un análisis conceptual que arrojara su creencia en una realidad objetiva, definida en términos de “estados reales” de los fenómenos físicos en un marco espacio-temporal, pues la problemática planteada por el argumento EPR gira en torno a tal principio de separabilidad y bajo éste subyace su concepción de “espacio” y de “intuición” o “sentido físico” (*anschaulich*), lo que nos conduce a la comprensibilidad del mundo objetivo.

¹⁴⁵ A partir de ahora, Einstein ya no se esforzará más en “completar” la física cuántica, o, como hacen las teorías de variables ocultas, interpretar causalmente las predicciones estadísticas de aquélla. Bohr le ha demostrado que tal tarea será siempre infructuosa, de modo que Einstein inicia la búsqueda de una nueva teoría partiendo de cero, es decir, de la eliminación de la constante de Planck. Este objetivo lo perseguirá a través de la teoría del campo único; su última esperanza de disponer de una teoría global, incluido el dominio atómico, que recupere el tipo de descripción física que él sigue considerando completa y “realista”.

a) Su teoría del conocimiento: el “credo epistemológico”

Acabo de realizar un breve recorrido por la concepción que la complementariedad sostenía acerca del tipo de descripción que una teoría física podía dar de la realidad natural. Pero ésta le resultaba tan aberrante a Einstein que, para combatirla, planteó lo que él mismo llamó su “credo epistemológico”, resultado éste de hacer explícitas sus ideas sobre la ciencia, tal y como la insistencia de Bohr, sobre la completud de la mecánica cuántica, había hecho necesario.

Cuando Einstein no aceptó el punto de vista de la complementariedad, que Bohr había propuesto para solucionar el problema de la descripción mecánico-cuántica, tachándolo de positivista y anti-realista, esta reacción sorprendió a algunos de sus colegas, incluido Bohr, ya que aquél había declarado en muchas ocasiones que el método que siguió hasta llegar a su teoría de la relatividad tenía mucho de positivista¹⁴⁶. Sin embargo, a lo largo de su vida, la postura filosófica de Einstein hacia la ciencia evolucionó desde el positivismo, que mantuvo durante su juventud, hasta la concepción más racionalista, que defendió ya durante la madurez y que llamó “credo epistemológico”.

Antes de entrar en él, mencionaré, una vez más, que Einstein insistió siempre en interpretar la postura de Bohr desde un punto de vista, absolutamente, positivista. Lo cual es injusto e inexacto, pues, a pesar de haberse apoyado en algunas ideas fenomenistas para alcanzar su objetivo, al igual que hizo el joven Einstein para construir su teoría de la relatividad, Bohr no quiso quedarse en el nivel positivista y respetó el compromiso ontológico entre teoría y realidad, que toda ciencia física pretende mantener. Pero, Einstein se negó a conceder el aspecto realista que aquél defendió con respecto a la existencia de objetos extralingüísticos, porque consideró injustificado el paso del fenomenismo al realismo, que Bohr postuló.

¹⁴⁶ “Bohr had met Einstein in 1920 during a visit to Berlin and knew of his reluctance to renounce continuity and causality. Yet, Bohr cherished the hope that the positivistic element in the complementarity interpretation would make Einstein change his mind, for Bohr was convinced, as were so many other later, that Einstein’s philosophy of science, in its early stages undoubtedly influenced by Mach, continued to be primarily positivistic. Bohr did not expect to fare with Einstein as Einstein fared with Mach”. JAMMER, M., The Philosophy of Quantum Mechanics, p.109.

Aquí es dónde se halla la gran divergencia entre Einstein y Bohr. Cuando este último refutó las interpretaciones realistas de Schrödinger acerca de la dualidad onda-corpúsculo, concluyó, con un cierto talante positivista, que no era posible tener imágenes pictóricas del mundo microfísico y que había que apartar de la representación objetiva “los procesos que tienen lugar en las categorías de espacio y tiempo”. Sin embargo, Einstein matizaría esta frase alegando que la física cuántica *no es capaz* de ofrecer tal representación espacio-temporal, pero este hecho no excluye toda posibilidad, pues Einstein analiza la misma cuestión, justamente, desde la orilla opuesta, desde la posibilidad lógica de que exista tal teoría. Su punto de partida intelectual es resumido por Heisenberg, en el siguiente párrafo, con una exactitud y concisión inigualables:

“Einstein había dedicado el trabajo de toda su vida a investigar el mundo objetivo de los procesos físicos que se despliega allá fuera, en el espacio y en el tiempo, independientemente de nosotros, según leyes fijas. Los símbolos matemáticos de la física teórica debían reflejar este mundo objetivo, y con esto posibilitar las predicciones sobre su comportamiento futuro. Ahora se afirmaba, en cambio, que, si se desciende al mundo de los átomos, no se da ya tal mundo objetivo en el espacio y el tiempo y que los símbolos matemáticos de la física teórica reflejan sólo lo posible, no lo fáctico. Einstein no estaba dispuesto -como él decía- a permitir que le quitaran el suelo de debajo de sus pies”¹⁴⁷.

Pero, ciertamente, Einstein tenía razón en esto: el positivismo no es capaz de justificar esta situación; no es suficiente afirmar que no es posible describir los procesos individuales sólo porque la actual teoría no pueda hacerlo. El físico alemán no andaba desencaminado al exigir a Bohr una justificación racional (realista), una base ontológica y una “fundamentación intuitiva” del proceso de construcción teórica de la ciencia, como él mismo hizo para sostener su postura. De tal forma que, para dar la razón a Bohr, tendríamos que justificar esta situación desde otro plano, que no sea el del formalismo teórico, dado que tal actitud se acerca, peligrosamente, al instrumentalismo físico.

Es cierto que, por unas razones u otras, una variedad de instrumentalismo se apoderó de la nueva generación de físicos a principios del siglo XX¹⁴⁸ y, aunque tal circunstancia favoreciera el clima de

¹⁴⁷ HEISENBERG, W., *Diálogos sobre física atómica*, p. 102.

¹⁴⁸ Cf. PYENSON, L., *El joven Einstein. El advenimiento de la relatividad*, pp. 258-278. En estas páginas Pyenson propone una serie de razones históricas, en las que no entraremos,

aceptación para su teoría de la relatividad, en años posteriores, Einstein, con sus nuevas ideas epistemológicas, pretende luchar contra el “creciente positivismo” y el instrumentalismo, que él ve que está arraigando demasiado entre los físicos¹⁴⁹, y, además, establecer, de una vez por todas, el criterio con el que decidir si una teoría es o no válida como tal.

Fue precisamente, para luchar contra esta nueva corriente positivista, fenomenista e instrumentalista, por lo que Einstein desarrolló su alternativa epistemológica. Antes de explicar el contenido de su “credo epistemológico”, en primer lugar, escribiré sobre las reflexiones gnoseológicas preliminares, acerca de la naturaleza de los conceptos, del pensamiento y de la ciencia, de las que Einstein parte.

“por las que, alrededor de 1913, los jóvenes físicos encontraron pasada de moda e incluso incomprensible la imagen clásica del mundo físico; y en porqué se hallaron favorablemente predispuestos a las propuestas del instrumentalismo matemático difundidas por los matemáticos puros del círculo de Klein en Gotinga”. (Ibid, p. 277). Y en cuanto a la actitud que tomó Einstein respecto a esta nueva ideología, un poco más arriba, escribe: “Einstein se opuso al planteamiento arrogante de la física de Gotinga; un planteamiento donde, partiendo de construcciones matemáticas puras que fueran gratas desde un punto de vista estético, uno podía confiar en alcanzar un entendimiento más profundo de la realidad física. El planteamiento de la física matemática de Gotinga impulsó la actitud del siglo XX hacia la realidad física, pero era únicamente una manifestación del nuevo punto de vista instrumentalista”.

¹⁴⁹ “Un joven físico en vísperas de la Primera Guerra Mundial habría estado predispuesto a aceptar una interpretación instrumentalista de las leyes físicas, en la que las matemáticas abstractas se unieran con hipótesis físicas «ad hoc» para producir complicadas síntesis teóricas. Tan hondo había calado el nuevo planteamiento instrumentalista (por llamarlo de alguna forma) que un joven físico al final de la Alemania de Guillermo II habría tenido dificultades en entender el compromiso de los físicos ortodoxos con lo que ellos llamaban una «imagen del mundo físico». *Ibid*, pp. 258-259. Einstein se opuso a esta tendencia porque él creía en el razonamiento físico y la conceptualización de la experiencia por medio de las nociones clásicas, las únicas que mantenían el significado físico. Idea ésta que acabó muy maltrecha dentro del ambiente que imperaba en su época: “El sentido físico» fue visto cada vez más por los más jóvenes como algo de menor importancia que la exigencia de que una teoría estuviera arropada por unas matemáticas elegantes. (...) Expresiones matemáticas poco corrientes reemplazaron a las nociones físicas clásicas, y teóricos como Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli y Paul Adrian Maurice Dirac atribuyeron un nuevo significado físico a sofisticadas expresiones matemáticas. Niels Bohr convenció a los físicos para aceptar una nueva epistemología indeterminista que pudiera dar cabida al éxito de los métodos formales en mecánica cuántica. Sin embargo, aquellos que compartían una concepción más vieja no se decidieron a aceptar el nuevo punto de vista y, con pocas excepciones, se abstuvieron de contribuir a la configuración de la nueva imagen del mundo”. (Ibid, p. 304).

Estas consideraciones previas aluden, básicamente, a tres términos, “concepto”, “pensamiento” y “ciencia”. Acerca del *concepto* dice que es una herramienta del pensamiento que sirve para ordenar nuestras impresiones a través de la recurrencia de una determinada imagen¹⁵⁰. En cuanto que el *pensamiento* es un “juego libre con conceptos”, cuya arbitrariedad se justifica por el “grado de comprensión” que nos aporta sobre las experiencias de los sentidos y que, a su vez, éstos nos informan sobre el mundo físico. Por consiguiente, la *ciencia* “es el empeño, secular ya, de agrupar por medio del pensamiento sistemático los fenómenos perceptibles de este mundo en una asociación lo más amplia posible. Dicho esquemáticamente, es intentar una reconstrucción posterior de la existencia a través del proceso de conceptualización”¹⁵¹. Por este motivo, también escribe:

“Una teoría es tanto más impresionante cuanto mayor es la simplicidad de sus premisas, cuanto más diversas sean las cosas que conecta entre sí y cuanto más amplio sea su ámbito de aplicación”¹⁵².

Siguiendo estas consideraciones gnoseológicas, le llevan a la concepción de su “credo epistemológico”¹⁵³, desde el que postula que las relaciones entre los conceptos son de naturaleza lógica, pero los conceptos en sí mismos son “supuestos libres” desde el punto de vista lógico, pues *su*

¹⁵⁰ “En vérité, les concepts indépendants et les systèmes de concepts utilisés dans les énoncés sont des créations humaines, des outils que nous avons nous-mêmes forgés, dont la légitimité et la valeur reposent en définitive sur le fait qu’ils nous permettent d’ordonner «avantegeusement» notre expérience (vérification). Autrement dit: ces outils sont justifiés dans la mesure où ils nous permettent d’«éclairer» notre expérience”. EINSTEIN, A., *Réflexions élémentaires concernant l’interprétation des fondements de la mécanique quantique*; en: *Quanta. Mécanique statistique et physique quantique*, pp. 251-252.

¹⁵¹ EINSTEIN, A., “Ciencia y religión (Parte II)” (1941), *Mis ideas y opiniones*, pp. 38-39. Y un poco más abajo, en las páginas 42-43, añade: “Aunque sea cierto que el objetivo de la ciencia es descubrir reglas que permitan asociar y predecir hechos, no es éste su único objetivo. Pretende también reducir las conexiones descubiertas al menor número posible de elementos conceptuales mutuamente independientes. Es en esta búsqueda de la unificación racional de lo múltiple donde se hallan sus mayores éxitos, aunque sea precisamente esta tentativa lo que presenta un mayor riesgo caer víctima de ilusiones. Pero todo el que haya pasado por la profunda experiencia de un avance positivo en este campo se siente conmovido por una profunda reverencia hacia la racionalidad que se manifiesta en la vida”.

¹⁵² EINSTEIN, A., *Notas Autobiográficas*, p. 35.

¹⁵³ Cf. *Ibid*, pp. 13-14 y 17-19.

contenido sólo se establece a través de su relación con nuestras experiencias sensitivas:

“Los conceptos y proposiciones sólo cobran «sentido» o «contenido» a través de su relación con experiencias de los sentidos. El nexo entre éstas y aquéllos es puramente intuitivo, no es en sí de naturaleza lógica. El grado de certeza con que se puede emprender esta relación, o conexión intuitiva, y nada más que ello, diferencia la mera fantasía de la «verdad» científica”¹⁵⁴.

Aquí he de añadir, a lo ya dicho en el segundo capítulo, una breve aclaración sobre el uso que hace Einstein del término “intuitivo”. El idioma alemán dispone de dos formas lingüísticas para dicho término: “anschaulich” e “intuitiv”. En este párrafo, y en este contexto, Einstein emplea “intuitiv”, que se tradujo, fácilmente, al inglés y al castellano por “intuitive” e “intuitivo”, respectivamente, para referirse al tipo de conexión o relación a la que Einstein denomina «una conexión intuitiva», y lo hace dándole el sentido de ser una percepción clara y evidente de una verdad, sin la mediación de la razón o de la lógica. Por este motivo, lo utiliza aquí para resaltar la manera cómo se realiza la conexión entre los conceptos y las percepciones, la cual no es, en absoluto, un procedimiento lógico. La razón de este pronunciamiento es oponerse de la manera más ferviente, que Einstein encontró, a la corriente logicista de la ciencia¹⁵⁵.

¹⁵⁴ *Ibid*, p. 17.

¹⁵⁵ “... es indispensable una vasta colección de hechos para establecer una teoría que tenga probabilidades de éxito. Pero este material no proporciona por sí mismo un punto de partida para una teoría deductiva; bajo el efecto de este material se puede, sin embargo, llegar a encontrar un principio general que podrá ser el punto de partida de una teoría lógica (deductiva). Pero no hay ningún camino *lógico* que conduzca desde el material empírico hasta el principio general sobre el cual reposará después la deducción lógica.

No creo pues que exista un camino del conocimiento de Mill basado sobre la inducción, en todo caso no un camino que pueda servir de método lógico. Por ejemplo, creo que no existe ninguna experiencia de la que se pueda deducir el concepto de número.

Cuanto más progresa la teoría, tanto más claro se hace que no se pueden encontrar por inducción las leyes fundamentales a partir de los hechos de la experiencia (por ejemplo, las ecuaciones del campo de la ecuación de la gravitación o de la ecuación de Schrödinger de la mecánica cuántica).

De una manera general, se puede decir: el camino que conduce de lo particular a lo general es un camino intuitivo, el que conduce de lo general a lo particular es un camino lógico”.
EINSTEIN, A./BESSO, M., Correspondencia con Michele Besso, carta 183 de Einstein, fechada el 20 de marzo de 1952, p. 406.

No obstante, en este texto citado está hablando de la *naturaleza* del vínculo o relación (“Beziehung”) entre concepto y percepción: conexión intuitiva (“intuitive Verknüpfung”; “intuitive connection”, en alemán y en inglés, respectivamente) y es importante fijarse que en este contexto no se refiere al “contenido intuitivo” (en alemán: “anschaulichen Inhalt”; en inglés: “intuitive content”); por lo cual, con el término “intuitiv” aquí no está aludiendo al *sentido* o al *contenido* en sí mismo, es decir al empleo que yo realizo del concepto “intuitivo”¹⁵⁶, sino meramente al carácter de la conexión. Para nombrar a éstos utilizaré “Sinn” e “Inhalt”, traducidos al inglés como “meaning” y “content”¹⁵⁷.

Pero, de momento, me quedaré en el aspecto referido al carácter del nexo entre conceptos y percepciones sensibles. Si este vínculo no es de naturaleza lógica sino *intuitiva*, entonces el pensamiento científico ha de tener un carácter constructivo y especulativo, puesto que Einstein emplea aquí el término “intuitivo” sólo en el sentido de *creación arbitraria* o “supuesto libre”. Esto lo defiende así para resaltar su postura en contra del *prejuicio positivista*, que consiste en:

“creer que los hechos por sí solos, sin libre construcción conceptual, pueden y deben proporcionar conocimiento científico. Semejante ilusión solamente se explica porque no es fácil percatarse de que aquellos conceptos que, por estar contrastados y llevar largo tiempo en uso, parecen conectados directamente con el material empírico, están en realidad libremente elegidos”¹⁵⁸.

¹⁵⁶ Ya mostraré en otro lugar que Einstein en otros textos utiliza “contenido intuitivo” en el mismo sentido que yo lo hago, distinguiendo entre “lo lógico-formal” y “el contenido intuitivo”, en un contexto diferente a éste donde sólo habla de la *naturaleza del nexo* concepto-percepción.

¹⁵⁷ El texto de Einstein, que acabo de citar, en su idioma original dice así: “Die Begriffe und Sätze erhalten «Sinn» bzw. «Inhalt» nur durch ihre Beziehung zu Sinnen-Erlebnissen. Die Verbindung der letzteren mit den ersteren ist rein intuitiv, nicht selbst von logischer Natur. Der Grad der Sicherheit, mit der diese Beziehung bzw. intuitive Verknüpfung vorgenommen werden kann, und nichts anderes, unterscheidet die leere Phantasterei von der wissenschaftlichen «Wahrheit»”. La traducción inglesa es la siguiente: “The concepts and propositions get «meaning», viz., «content», only through their connection with sense-experiences. The connection of the latter with the former is purely intuitive, not itself of a logical nature. The degree of certainty with which this relation, viz., intuitive connection, can be undertaken, and nothing else, differentiates empty phantasy from scientific «truth»”. EINSTEIN, A., *Autobiographical Notes*. In: *Albert Einstein: Philosopher and Scientist*, pp. 12-13 (op. ya citada).

¹⁵⁸ EINSTEIN, A., *Notas Autobiográficas*, p. 49.

Es este aspecto el que justifica, según Einstein, la búsqueda de una nueva teoría y, también, el que le separa del positivismo que defendió durante su juventud:

“La verdadera grandeza de Mach la veo yo en su incorruptible escepticismo e independencia; pero de joven también me impresionó mucho su postura epistemológica, que hoy me parece esencialmente insostenible. Pues Mach no colocó en su justa perspectiva la naturaleza esencialmente constructiva y especulativa de todo pensamiento y, en especial, del pensamiento científico, condenando en consecuencia la teoría precisamente en aquellos lugares donde aflora inconfundiblemente el carácter constructivo-especulativo, «verbi gracia», en la teoría cinética de los átomos”¹⁵⁹.

La especulación teórica es el rasgo más característico del “credo epistemológico” de Einstein y es el que más le acerca a una concepción racionalista de la ciencia, que defendió durante sus años de madurez y que más le alejó del positivismo de Mach; así es cómo también lo describe Cohen:

“Einstein dijo que siempre había creído que la invención de conceptos científicos y la construcción de teorías sobre ellos, era una de las propiedades creadoras de la mente humana. Su propio punto de vista era así opuesto al de Mach, porque Mach suponía que las leyes de la ciencia son solamente una manera económica de describir una gran colección de hechos”¹⁶⁰.

Ciertamente sostuvo un positivismo influenciado por Ernst Mach y reconocido por el propio Einstein, pero que fue mitigándose con los años; así, en 1948 escribe estas palabras en relación con el filósofo alemán:

“Su gran mérito es haber flexibilizado el dogmatismo que reinaba en los siglos XVIII y XIX sobre los fundamentos de la física. Trató de mostrar, sobre todo en la mecánica y en la teoría del calor, cómo los conceptos han nacido de la experiencia. Defendió con convicción el punto de vista según el cual estos conceptos, incluso los más

¹⁵⁹ *Ibid*, p. 25.

¹⁶⁰ COHEN, I.B., *Sci. Amer.*, julio de 1955, p. 69. Citado por Abraham Pais en El Señor es sutil... La ciencia y la vida de Albert Einstein, p. 287.

fundamentales, no extraen su justificación sino de la experiencia, y no son, en manera alguna, necesarios desde el punto de vista *lógico*. Su acción fue particularmente bien hechora cuando mostró claramente que los problemas más importantes de la física no son de naturaleza matemático-deductiva; los más importantes son los que se refieren a los principios básicos. Yo veo su punto débil en el hecho de que creía poco más o menos que la ciencia consistía en poner orden en el material experimental, es decir, que ignoró el elemento constructivo libre en la elaboración de un concepto. Pensaba de alguna manera que las teorías son el resultado de un *descubrimiento* y no de una *invención*. Iba incluso tan lejos, que consideraba las «sensaciones» no solamente como un material concebible sino también, en cierta medida, como los materiales de construcción del mundo real; creía poder llenar así el abismo que hay entre la psicología y la física. Si hubiese sido completamente consecuente, no solamente habría debido rechazar el atomismo, sino también la idea de una realidad física (...). Por lo demás, es interesante observar que Mach rechazó con encarnizamiento la teoría de la relatividad restringida (Ya no vivía en la época de la teoría de la relatividad general). La teoría le parecía sobrepasar en especulación todo cuanto está permitido. No sabía que este carácter especulativo pertenece también a la mecánica de Newton y, en general, a toda teoría imaginable. No hay más que una diferencia de grado entre las teorías, en la medida en que los caminos del pensamiento desde los principios básicos hasta las consecuencias comprobables por la experiencia son de longitud y complicación diferentes”¹⁶¹.

En esta concepción del proceso creativo de la ciencia, él mismo reconoce la influencia de Hume y la de Kant en algunos aspectos, aunque, a pesar de las declaraciones que hizo respecto a sus influencias filosóficas, es muy difícil catalogar la postura que mantuvo Einstein durante su madurez dentro de un determinado sistema filosófico.

En concreto, de Hume toma el rechazo a la derivación o creación lógica-inductiva de todos los conceptos porque, según Einstein, la validez de éstos no está en que puedan deducirse de la experiencia (afirmación que atenta contra el empirismo), pues no hay un *punte lógico* entre la experiencia y los conceptos. Su validez únicamente estaría en que aquéllos y las leyes físicas hagan inteligible la experiencia, es decir “... *reside en el*

¹⁶¹ EINSTEIN, A./BESSO, M., Correspondencia con Michele Besso, carta 153 de Einstein, fechada el 6 de enero de 1948, pp. 353-354.

*grado de comprensión que con su ayuda podemos adquirir sobre las experiencias de los sentidos*¹⁶², lo cual le aleja del apriorismo kantiano:

“Hume vio claramente que determinados conceptos, el de causalidad por ejemplo, no pueden derivarse del material de la experiencia mediante métodos lógicos. Kant, absolutamente persuadido de que ciertos conceptos son imprescindibles, teníalos -tal y como están elegidos- por premisas necesarias de todo pensamiento, distinguiéndolos de los conceptos de origen empírico. Yo estoy convencido, sin embargo, de que esta distinción es errónea o, en cualquier caso, de que no aborda el problema con naturalidad. Todos los conceptos, incluso los más próximos a la experiencia, son, desde el punto de vista lógico, supuestos libres, exactamente igual que el concepto de causalidad, que fue inicialmente el punto de arranque de esta cuestión”¹⁶³.

Sin embargo, es posible que sus aspiraciones sean de corte kantiano, pues, aunque no se adhiera al apriorismo de aquél, defiende un equilibrio (alejado del inductismo) entre empirismo y racionalismo¹⁶⁴ que le condujo a hacer la siguiente observación:

¹⁶² EINSTEIN, A., Notas Autobiográficas, p. 14. Incluso del concepto de “objeto”, dice Einstein que, desde el punto de vista lógico es “una libre creación de la mente humana” (“Física y realidad” (1936), Mis ideas y opiniones, p. 262).

¹⁶³ EINSTEIN, A., Notas Autobiográficas, pp. 18-19. “La estructura del sistema es resultado del trabajo de la razón; el contenido empírico y sus mutuas relaciones deben hallar su presentación en las conclusiones de la teoría. En la posibilidad de tal representación está contenido el único valor y la justificación de todo el sistema, y en especial la de los conceptos y principios fundamentales que los sustentan. Más allá de esto, dichos principios fundamentales son invenciones libres del intelecto humano, que no pueden ser justificadas ni por la naturaleza de ese intelecto ni de ninguna otra manera apriorística.

Estos conceptos y postulados fundamentales, que no pueden ya ser reducidos lógicamente, forman la parte esencial de una teoría, un núcleo que la razón no alcanza a comprender. El objetivo principal de toda teoría es lograr que esos elementos irreductibles sean tan simples y tan pocos en cantidad como sea posible, sin tener que renunciar a la representación adecuada de ningún contenido empírico. (...) todo intento de deducción lógica de los conceptos básicos y postulados de la mecánica a partir de las experiencias elementales está condenado al fracaso”. EINSTEIN, A., “Sobre el método de la física teórica” (1933), Mis ideas y opiniones, pp. 244-245.

¹⁶⁴ Cf. MARGENAU, H., “Einstein’s Conception of Reality”, en: SCHILPP, P.A., Albert Einstein: Philosopher-Scientist, pp. 245-249, y la respuesta de Einstein en la misma obra, “Remarks to the Essays Appearing in this Collective Volume”, pp. 679-680.

“No he crecido dentro de la tradición kantiana, sino que he llegado bastante tarde a comprender el verdadero valor que encierra su doctrina, al margen de los errores que hoy en día son bastante obvios. Aquél está contenido en la sentencia: «Lo real no nos es dado, sino puesto (*aufgegeben*) (por medio de una criba)». Esto, obviamente, significa: Hay algo así como una construcción conceptual para comprender lo inter-personal, la autoridad de la cual descansa en su convalidación. Esta construcción conceptual se refiere, precisamente, a lo «real» (por definición), y toda cuestión posterior concerniente a la «naturaleza de lo real» aparece vacía”¹⁶⁵.

A este respecto, Lewis Pyenson escribe:

“La peculiaridad que más perplejidad causa -en la concepción epistemológica del Einstein maduro- se halla en la insistencia de Einstein en que, aun cuando las teorías científicas fueran invenciones libres del espíritu humano y aun cuando las abstracciones matemáticas reflejaran la realidad física, el experimento constituía todavía la base de los avances de la ciencia y la intuición física era todavía esencial para adivinar cuál de las muchas armonías matemáticas posibles correspondía de hecho a los acontecimientos en el mundo real. Serviría de muy poco intentar circunscribir las preocupaciones metodológicas posteriores de Einstein dentro de los confines de una u otra escuela filosófica. Con todo, una observación que hizo en 1949 en una respuesta colectiva a sus críticos proporciona una sinopsis concisa de su postura. Einstein

¹⁶⁵ EINSTEIN, A., “Remarks to the Essays Appearing in this Collective Volume”, en: SCHILPP, P.A., *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, p. 680. Concretamente, Einstein admite en estas páginas que, al igual que Kant, él también aprendió de Hume que “there are concepts (as, for example, that of causal connection), which play a dominating rôle in our thinking, and which, nevertheless, can not be deduced by means of a logical process from the empirically given (a fact which several empiricists recognize, it is true, but seem always again to forget). What justifies the use of such concepts? Suppose he had replied in this sense: Thinking is necessary in order to understand the empirically given, and concepts and «categories» are necessary as indispensable elements of thinking” (Ibid, p. 678). Pero, a continuación, rechaza la existencia de juicios sintéticos *a priori*, en lo que Einstein considera un error de Kant, comprensible en su época, y en la página 674 especifica que la diferencia entre ambos es que para Kant las categorías eran absolutas e inalterables y para Einstein son, en un sentido lógico, invenciones libres: “The theoretical attitude here advocated is distinct from that of Kant only by the fact that we do not conceive of the «categories» as unalterable (conditioned by the nature of the understanding) but as (in the logical sense) free conventions. They appear to be *a priori* only insofar as thinking without the positing of categories and of concepts in general would be as impossible as is breathing in a vacuum”. En el último capítulo volveré sobre el papel de la filosofía de Kant en esta polémica sobre la física cuántica.

mencionó la «penetrante visión, realmente valiosa» de Immanuel Kant¹⁶⁶.

Pero, tampoco hay que olvidar otras influencias, como la de Mach, que a pesar de su posterior rechazo al positivismo de éste, aún conserva de él la apelación a la simplicidad y a la base observable. Por ello, afirma:

“En cuanto a la influencia de Mach sobre la evolución de mi pensamiento, ha sido ciertamente muy grande. Recuerdo muy bien que tú me habías hecho prestar atención a su tratado de mecánica y a su teoría del calor en los tiempos de mis primeros años de estudios, y que estas obras me habían causado una gran impresión. Hasta qué punto han influido sobre mi propio trabajo, hablando francamente, no lo veo con claridad. Por lo que recuerdo, D. Hume ha ejercido sobre mí una influencia directa más grande¹⁶⁷.”

Esta influencia, que Einstein *no ve con claridad*, Pyenson la resume así:

“Einstein se vio atraído por Mach debido al acercamiento iconoclasta de este último a la epistemología; Mach opinaba que la evidencia observable proveía la única base para discutir los éxitos de una teoría. A Einstein le gustaba, asimismo, la apelación de Mach a la simplicidad. Era una apelación que requería el ejercicio libre de la intuición física al seleccionar aquellas ideas, entre otras muchas posibles, que debían proponerse como principios físicos. Siguiendo este esquema de cosas, Einstein naturalmente habría visto las matemáticas como proveedoras de herramientas útiles, pero aportando una base insuficiente para determinar intuitivamente las leyes de la naturaleza¹⁶⁸.”

No obstante, Pais propone que la influencia de Mach fue sólo en su vertiente científica: la relatividad del movimiento, la abolición del espacio absoluto y el origen dinámico de la inercia¹⁶⁹. Esto puede ser verdad, en cuanto al Einstein maduro, que, por cierto, es el que tiene relevancia e interés para este estudio, pero, tal y como reconoce Einstein, Mach sí le

¹⁶⁶ PYENSON, L., El joven Einstein. El advenimiento de la relatividad, p. 119.

¹⁶⁷ EINSTEIN, A./BESSO, M., Correspondencia con Michele Besso, carta 153 de Einstein, fechada el 6 de enero de 1948, pp. 354.

¹⁶⁸ PYENSON, L., El joven Einstein. El advenimiento de la relatividad, p. 121.

¹⁶⁹ Cf. PAIS, A., El Señor es sutil... La ciencia y la vida de Albert Einstein, pp. 285-292.

influyó durante su juventud y puede que también conservara de él los aspectos que Pyenson reconoce como machianos en el pensamiento de Einstein. Aunque también es posible que no los tomara de él; pero, dado que este trabajo no pretende ser un estudio sobre el origen y la historia de los antecedentes e influencias de Einstein, no me pronunciaré sobre este tema. Mi interés se centra en el contenido de los elementos que constituyen su credo epistemológico y dos de ellos son, ciertamente una apelación a la base observable de la ciencia y a la simplicidad lógica de sus axiomas y premisas.

Otra influencia importante es la idea pitagórico-platónica que Leibniz defendía de las matemáticas, a través de su noción de “armonía preestablecida”. Porque, si la base de la ciencia es la especulación teórica, la única forma de evitar la arbitrariedad y justificar la validez, y por extensión la completud, de una teoría será apelar al criterio pitagórico-platónico de verdad matemática, que, a su vez, utilizó Leibniz en su noción de “armonía preestablecida”, según la cual la naturaleza de la realidad física se adapta al pensamiento abstracto de la matemática:

“Ninguna persona que haya entrado en la materia con profundidad podrá negar que, en la práctica, el mundo de los fenómenos determina unívocamente el sistema teórico, a pesar de que no existe puente lógico entre los fenómenos y sus principios teóricos. Esto es lo que Leibniz, con una feliz expresión, ha definido como «armonía preestablecida»¹⁷⁰.

En este punto el pensamiento de Einstein también sufrió un cambio, ya que, durante su juventud, no concedió a las matemáticas más que un valor heurístico, sin ningún significado físico¹⁷¹. Aunque Einstein nunca llegó a creer que las leyes físicas se derivaran directamente de construcciones matemáticas y, aunque nunca les concediera ningún tipo de prioridad sobre el proceso de *conceptualización física*, al final tuvo que admitir que las matemáticas y el razonamiento físico estaban imbricados.

“Si es verdad, pues, que la base axiomática de la física teórica no puede ser extraída de la experiencia y debe ser inventada con libertad ¿podemos esperar que alguna vez hallemos el camino correcto? (...) Sin

¹⁷⁰ EINSTEIN, A., “Principios de investigación” (1918), Mis ideas y opiniones, p. 201.

¹⁷¹ “Para el joven Einstein el formalismo matemático era sólo una herramienta al servicio de lo que él y otros denominaban «razonamiento físico». Einstein creía que a las leyes fundamentales de la física se llegaba por una comparación minuciosa con los fenómenos experimentales”. PYENSON, L., El joven Einstein. El advenimiento de la relatividad, p. 63.

ninguna vacilación responderé que, según mi opinión, existe un camino correcto y que nosotros somos capaces de hallarlo.

Hasta el momento presente nuestra experiencia nos autoriza a creer que la naturaleza es la realización de las ideas matemáticas más simples que se pueda concebir. Estoy convencido de que, por medio de construcciones puramente matemáticas, podemos descubrir los conceptos y las leyes que los conectan entre sí, que son los elementos que proporcionan la clave para la comprensión de los fenómenos naturales. La experiencia puede sugerir los conceptos matemáticos apropiados, pero éstos, sin duda alguna, no pueden ser deducidos de ella. Por supuesto que la experiencia retiene su cualidad de criterio último de la utilidad física de una construcción matemática. Pero el principio creativo reside en la matemática. Por lo tanto, en cierto sentido, considero que el pensamiento puro puede captar la realidad, tal como los antiguos lo habían soñado”¹⁷².

El comentario que realiza Pyenson de esta manifestación de Einstein es muy acertado y revelador:

“Esta confesión marca uno de los contrastes más sorprendentes entre el pensamiento de un Einstein joven y el de un Einstein investigador ya en su madurez. (...) Durante el período que siguió a la hecatombe de la mecánica clásica, esta noción {la armonía preestablecida} estuvo llamada a apoyar un sentimiento creciente que favorecía las formas simbólicas frente a lo que tradicionalmente se había llamado «el contenido físico». En un escrito de 1927, tras los éxitos de la mecánica cuántica, Erns Cassirer señalaba: *La física ha dejado definitivamente el reino de la representación y de la representabilidad en general por un reino más abstracto. El esquematismo de las imágenes ha dado paso al simbolismo de los principios. Por supuesto, la fuente empírica de la teoría física moderna no se ha visto afectada lo más mínimo por esta concepción. Mas la física ya no trata directamente de lo existente en cuanto que materialmente real; trata de su estructura, de su contexto formal*”¹⁷³.

¹⁷² EINSTEIN, A., “Sobre el método de la física teórica” (1933), Mis ideas y opiniones, pp. 245-246.

¹⁷³ PYENSON, L., El joven Einstein. El advenimiento de la relatividad, p. 230. (La cita corresponde a CASSIRER, E., The Philosophy of Symbolic Forms 3: The Phenomenology of Knowledge, p. 467, New Haven, 1957; traducido por Ralph Mannheim).

Las últimas declaraciones de Einstein conducen hasta aquello que justifica la relación entre la realidad objetiva y nuestras construcciones teóricas. Se trata de su “sentimiento cósmico religioso”, el cual contiene la creencia en un universo comprensible para el intelecto humano porque aquél es “racional”, en el sentido de que posee una estructura ordenada y matemática, consecuencia de la cual, nos resulta posible construir las leyes naturales sobre él¹⁷⁴.

Esta “profunda convicción” suya no se deriva de su credo epistemológico ni puede ser justificada de ninguna manera racional; es una creencia, un acto de fe, una verdad que no puede ser inferida ni comprendida por la razón¹⁷⁵. Pero, Einstein la convierte en un postulado necesario, en una petición de principio, para que la actividad científica del físico tenga sentido: sobre ella se sustenta el aserto acerca de que la descripción física es una descripción de la realidad, esto es, que la ciencia es una *captación* de “lo real”.

Pues, si la ciencia es una creación de la razón, en tanto elemento ordenador del material sensible a la hora de formar conceptos y leyes, la única solución, que le queda a Einstein para saldar la arbitrariedad que contiene este *racionalismo especulativo*, es postular la necesidad de una correspondencia entre lo racional y lo empírico, entre la teoría y la experiencia, entre los conceptos y las propiedades reales de los objetos¹⁷⁶. Si no lo hiciera así, cualquier teoría que, simplemente, se ajustara a los

¹⁷⁴ Cf. EINSTEIN, A., “Física y realidad” (1936) y “Religión y ciencia” (1930), *Mis ideas y opiniones*, pp. 261-291 y pp. 32-35, respectivamente. Este aspecto del pensamiento de Einstein acerca del «sentimiento de asombro extasiado» lo describe, de una manera clara y concisa, Gerald Holton en su artículo “*What, precisely, is «thinking»?*” *Einstein’s answer*, pp. 161-163, en: FRENCH, A.P., *Einstein. A centenary volume*, pp. 153-167. Pero una exposición completa sobre el papel que el pensamiento de Einstein le otorga a la razón del sujeto, como elemento constructor y ordenador, se encuentra en: RIOJA, A., “Einstein: el ideal de una ciencia sin sujeto”, *Revista de Filosofía*, nº 2, pp. 87-108.

¹⁷⁵ Este fundamento irracional de la actividad científica es, aunque parezca paradójico, consecuencia de su racionalismo. En realidad, toda postura racionalista, que pretenda fundamentar la exterioridad de un mundo independiente, necesita, en última instancia, recurrir a elementos irracionales para ser consistente con el realismo que se propuso defender: le ocurrió a Descartes en su “tercera meditación” cuando postuló la idea de Dios, a Leibniz cuando apeló a una armonía preestablecida, a Kant en su recurso al noumeno dentro del esquematismo, e incluso, por otro lado, a Berkeley cuando introdujo elementos racionalistas, las “ideas arquetipos”, para salir del solipsismo al que le condujeron los principios fenomenistas de un planteamiento como el suyo, estrictamente, empirista.

¹⁷⁶ Nótese que este postulado fue explicitado por la filosofía del lenguaje con el nombre de “isomorfismo estructural” entre el lenguaje y el mundo.

hechos observados, como la física cuántica, sería una descripción legítima de la realidad, o dicho de otro modo, su criterio ontológico, con el que se decide si una teoría es completa, perdería toda validez.

De toda esta vorágine de ideas que constituyen el credo epistemológico¹⁷⁷, podemos destacar que es el propio Einstein, en su respuesta a los artículos que recopiló Schilpp, quien subraya que la “ciencia sin epistemología es primitiva y confusa”¹⁷⁸, aunque, al mismo tiempo, admite que el científico, dada su condición, no puede adherirse a un único sistema filosófico para construir su mundo conceptual, como hace el epistemólogo; por ello, Einstein concluye así, con un retrato que hace de sí mismo:

“Por tanto, él -el científico- debe aparecer ante el epistemólogo sistemático como un tipo de oportunista sin escrúpulos: aparece como *realista*, en tanto que busca describir un mundo independiente de los actos de la percepción; como *idealista*, en tanto que contempla los conceptos y las teorías como libre invenciones del espíritu humano (no lógicamente derivable de lo que es empíricamente dado); como *positivista*, en tanto que él considera sus conceptos y teorías justificados *sólo* hasta el punto de que ellos nos facilitan una representación lógica de las relaciones entre las experiencias sensoriales. También puede,

¹⁷⁷ Einstein y otros muchos acusaron a Bohr de ser oscuro a la hora de expresar sus ideas, pero Einstein no fue ni la mitad de sistemático que fue Bohr en sus exposiciones. Es cierto que este último no explicaba todo lo que decía y que, a veces, parece escribir en forma de sentencias; por el contrario, Einstein siempre presentó un desarrollo pormenorizado de todas sus ideas. Sin embargo, confundió y refundió conceptos filosóficos generales; no siempre utilizó los mismos términos para referirse a las mismas cosas (como es el caso del término “intuición”); no distinguió entre el espacio matemático, el espacio físico, el espacio de la percepción y el espacio gnoseológico, a pesar de la importancia que tiene en su pensamiento esta distinción, pues basó sus argumentos, la justificación de su postura y el fundamento de su crítica en la noción de espacialidad, que tiene un sentido muy amplio si no la definimos. Bohr fue más cuidadoso con su lenguaje, pero se mostró muy cauto con la problemática ontológica; fue bastante esquivo en relación con los asuntos más comprometidos: realismo, marco ontológico y significado analógico de los conceptos; fue demasiado sutil con estos temas y sólo lanzó propuestas, pero éstas dejaron abierto un camino a seguir, una propedéutica, para la investigación filosófica posterior, en la que él mismo advirtió que no se atrevió a entrar. ¿Cuál de los dos fue “más oscuro”?

¹⁷⁸ “The reciprocal relationship of epistemology and science is of noteworthy kind. They are dependent upon each other. Epistemology without contact with science becomes an empty scheme. Science without epistemology is -insofar as it is thinkable at all- primitive and muddled”. EINSTEIN, A., “Remarks to the Essays Appearing in this Collective Volume”, en: SCHILPP, P.A., Albert Einstein: Philosopher-Scientist, p. 683-684.

igualmente, aparecen como *platónico* o *pitagórico*, en tanto que considera el punto de vista de la simplicidad lógica como una herramienta indispensable y efectiva en su investigación”¹⁷⁹.

A partir de este planteamiento epistemológico, Einstein lanza su nuevo enfrentamiento contra la mecánica cuántica, apelando a las razones estéticas de una concepción racionalista y anti-positivista de la ciencia, donde las teorías físicas son construcciones especulativas¹⁸⁰, cuyo valor cognoscitivo, o contenido de verdad, de tal construcción estará en función únicamente de su finalidad, que es la de ofrecer un sistema axiomático y conceptual lo más sencillo posible para toda la física, desde el que coordinar y ordenar *la totalidad de las experiencias sensoriales*:

“Según mi opinión, cada teórico verdadero es una especie de metafísico domesticado, por mucho que fantasee acerca de su «positivismo». El metafísico cree que lo lógicamente simple es también lo real. El metafísico domesticado cree que no todo lo que es lógicamente simple es realidad empírica, sino que la totalidad de toda la experiencia sensorial puede ser «comprendida» sobre la base de un sistema conceptual, construido con el apoyo de premisas de gran simplicidad. El escéptico dirá que esto es «fe en el milagro». Admitámoslo así, pero se trata de un credo que, con el desarrollo de la ciencia, ha resultado de manera asombrosa (...)

La idea teórica (en este caso el atomismo) no surge como un hecho alejado e independiente de la experiencia; tampoco puede ser derivada de la experiencia a través de un procedimiento meramente lógico.

En realidad, es el producto de un acto creativo. Una vez que se ha formulado una idea teórica, es preciso aferrarse a ella hasta el momento en que nos conduzca a una conclusión insostenible”¹⁸¹.

Según Einstein, ésta es la situación de la mecánica cuántica, la cual ha llegado a esa “conclusión insostenible” al no poder dar una descripción

¹⁷⁹ EINSTEIN, A., “Remarks to the Essays Appearing in this Collective Volume”, en: SCHILPP, P.A., *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, p. 684.

¹⁸⁰ “Una teoría puede contrastarse con la experiencia, pero no hay ningún camino de la experiencia a la construcción de una teoría. Ecuaciones tan complejas como las del campo gravitacional sólo pueden hallarse a base encontrar una condición matemática lógicamente sencilla que determine por completo, o casi por completo, las ecuaciones”. (EINSTEIN, A., *Notas Autobiográficas*, p. 83-84).

¹⁸¹ EINSTEIN, A., “Acerca de la teoría de la gravedad generalizada” (1950), *Mis ideas y opiniones*, pp. 309-310.

completa de los *estados reales* de los sistemas físicos como entes autónomos en el espacio y en el tiempo, es decir, dicha teoría pretende describir estadísticamente una realidad inseparable del sujeto que la estudia y donde no se respeta la separabilidad espacial de los sistemas; Einstein luchará siempre contra, lo que él llamó, este *positivismo primario*:

“En efecto, se puede adoptar la posición que consiste en considerar como «real» únicamente el resultado singular de una observación, y no cualquier cosa que tenga una existencia objetiva en el espacio y el tiempo, independientemente de la observación. Evidentemente, si uno adopta este punto de vista positivista puro y duro, no es necesario preguntarse qué se entiende por «estado real» en el dominio de la teoría cuántica. Mejor pelearse contra molinos de viento”¹⁸².

No obstante, su nueva etapa crítica no se queda aquí: además, arremete contra la nueva teoría acusándola de instrumentalista en el sentido de que su sistema conceptual carece de *sentido* o *contenido físico*. Pero, ya me detendré en su lugar oportuno en la argumentación por la que llega a tal conclusión. De momento seguiré el hilo expositivo de las ideas que Einstein defendió para proponer su alternativa epistemológica de la ciencia, de la cual el primer nivel lo constituye su estudio acerca del origen de los conceptos físicos y su proceso de formación.

b) El origen y la formación de los conceptos físicos

Hasta ahora se ha visto que, tanto para Einstein como para Bohr, el lenguaje ordinario es el que ha de aportar el significado físico a los conceptos descriptivos de la teoría cuántica y, por tanto, es la base indispensable sobre la que se levanta cualquier posible interpretación del formalismo cuántico. Además, ambos piensan que las nociones llamadas “clásicas” no son exclusivas de la física clásica, sino que tienen un valor más general, o si se prefiere más básico, con el que aludimos al mundo de nuestra experiencia humana y no sólo al área de aplicabilidad de la física clásica¹⁸³. Esto es debido a que el origen de los conceptos está siempre en

¹⁸² EINSTEIN, A., *Réflexions élémentaires concernant l'interprétation des fondements de la mécanique quantique*, en: *Quanta. Mécanique statistique et physique quantique*, p. 251.

¹⁸³ “Los conceptos que tú -se refiere a Newton- creaste siguen rigiendo nuestro pensamiento físico, aunque ahora sabemos que hay que sustituirlos por otros más alejados de la esfera de la experiencia inmediata si aspiramos a una comprensión más profunda de la

nuestra experiencia ordinaria y por ello los consideran indispensables para describir la realidad física, incluido el nivel cuántico, ya que no podemos obtener otros nuevos que describan aquél, porque no es posible la observación directa sobre la región atómica.

La diferencia en el pensamiento de los dos físicos es sutil. Bohr defiende que, aunque estos conceptos se hayan formado a partir de la observación humana, cuando, más tarde, una teoría física entra en juego, éstos son pulidos por aquélla y su significado es adaptado a las condiciones lógicas que los postulados de la teoría requieren. Esta situación es a la que se refiere Bohr cuando habla de las relaciones que los conceptos mantienen dentro de un determinado marco conceptual, ya que éste es “la representación lógica no ambigua de relaciones entre hechos de la experiencia”¹⁸⁴. Cada teoría física tiene su propio marco conceptual, que es el que dicta las normas sobre la aplicabilidad de los conceptos a las situaciones empíricas, es decir, cuándo, cómo y sobre qué fenómeno se puede aplicar o usar un determinado concepto. Esta idea es la que le abre la puerta a su filosofía de la complementariedad, puesto que los mismos términos “clásicos” pueden seguir usándose en la nueva teoría aunque bajo otras condiciones, las cuales permiten cambiar el tipo de relaciones que mantenían dentro del marco conceptual de la física clásica por otras nuevas que reajusten su significado como ya lo habían hecho anteriormente, pero, ahora, al ámbito de los fenómenos cuánticos.

Sin embargo, Einstein, cuyo punto de arranque no difiere mucho del que parte Bohr¹⁸⁵, no acepta la propuesta de disponer de diferentes

situación”. EINSTEIN, A., Notas Autobiográficas, pp. 34-35. Incluso en otra ocasión llega a afirmar lo siguiente: “La manera científica de formar conceptos se distingue de la que utilizamos en la vida de cada día no sustancialmente, sino sólo en la mayor precisión de las definiciones de los conceptos y las conclusiones; una elección más esmerada y sistemática del material experimental; una mayor economía lógica. Esto último significa el esfuerzo por reducir todos los conceptos y correlaciones a la menor cantidad posible de conceptos y axiomas básicos lógicamente independientes”. EINSTEIN, A., “Los fundamentos de la física teórica” (1940), Mis ideas y opiniones, p. 292.

¹⁸⁴ BOHR, N., Física atómica y conocimiento humano, p. 84.

¹⁸⁵ Me refiero a la importancia de la experiencia en la formación de los conceptos, aunque el papel que ambos le conceden en este proceso es diferente. Para Bohr los conceptos se forman a partir de nuestras experiencias sensoriales y de una posterior depuración del lenguaje ordinario. Para Einstein es la razón la que forma los conceptos, si bien han sido sugeridos por la experiencia y serán contrastados por ella, pero es la razón quien tiene la última palabra en tanto que establece los requisitos de armonía y simplicidad para ordenar el material sensible que la experiencia nos aporta. Por este motivo, Einstein defenderá, como se verá después, el principio de relatividad, como punto de partida para el posterior avance

marcos conceptuales, ya que admitir que cada teoría tenga su propio marco conceptual es incompatible con su apuesta por un único sistema axiomático y conceptual para toda la física, a la vez sencillo y global¹⁸⁶. Así, los conceptos “clásicos”, que se usan para describir los fenómenos cuánticos, han de tener el mismo significado físico que en el resto de las teorías y, en concreto, que en su teoría de la relatividad¹⁸⁷. Por ello, a Einstein no le parece viable la salida de Bohr a través de una modificación del significado y uso de los conceptos clásicos, ya que ésta se basa en la noción de marco conceptual, que Bohr propone en su lección epistemológica acerca de las diferentes relaciones lógicas de los conceptos según qué marco conceptual y según sobre qué postulados se edifique éste. Para Einstein, los sistemas conceptuales de las diferentes teorías físicas han de armonizar entre sí con el objetivo de ofrecer un marco general, para todo el pensamiento físico, lógicamente simple y empíricamente confirmado¹⁸⁸.

Retomaré la concepción de Einstein acerca de la formación de los conceptos descriptivos: los conceptos son “libres invenciones de la razón”, pero adquieren sentido, o contenido empírico, a través de la experiencia. No obstante, lo más importante es que esta experiencia se ha de inscribir siempre dentro de los límites del marco espacio-temporal¹⁸⁹, para que los objetos puedan disfrutar de una existencia autónoma y la descripción física se refiera a los estados reales de los sistemas¹⁹⁰:

de la ciencia, frente al principio de superposición de la ecuación de Schrödinger, el cual implica la violación del postulado de localidad.

¹⁸⁶ Más adelante, justificaré que tal es la razón por la que Einstein piensa que ni la física cuántica ni la teoría de la relatividad general están en disposición de ofrecer una descripción completa de la realidad.

¹⁸⁷ Próximamente, expondré el significado y el papel que juega la representación espacio-temporal en su teoría de la relatividad e incluso en la teoría del campo único.

¹⁸⁸ Cf. EINSTEIN, A., *Notas Autobiográficas*, pp. 25-27.

¹⁸⁹ Dicho de otro modo: la experiencia se ha de ajustar a los elementos racionales.

¹⁹⁰ Sin embargo, ya se ha visto que esta apelación a la independencia de la realidad física se basa en el postulado de la localidad, por tanto dicha “apelación” no es en absoluto arbitraria. Cuando Einstein invocaba a su “instinto científico”, éste, en realidad, se apoyaba en el hecho de que la violación de tal postulado provocaría una anomalía causal que echaría por tierra la base sobre la que se levanta su teoría de la relatividad. (En relación con el tema de las “anomalías causales”, véase, por ejemplo, REICHENBACH, H., *¿Existen los átomos?*, pp. 192-195. En: *La filosofía científica*, pp. 173-199.)

“Esto no significa que desde este punto de vista, esto es de la verificación, se deba juzgar la legitimidad de los conceptos y de los sistemas de conceptos. Esto vale igualmente para los conceptos de «realidad física», de «realidad del mundo exterior», del «estado real de un sistema». *A priori* no es más legítimo suponerlos indispensables (para el pensamiento) que rechazarlos; sólo la verificación permite zanjar la cuestión. Detrás de los símbolos que constituyen estas palabras, hay un programa, el cual jugó un papel absolutamente determinante en el desarrollo del pensamiento físico, justo hasta la llegada de la teoría cuántica: todo debe ser referido a los objetos conceptuales pertenecientes a la esfera de las ideas espacio-temporales y a las leyes que se supone expresan las relaciones entre objetos. Una descripción así no hace intervenir nada que sea del orden de un saber empírico que trate de (se apoye sobre) estos objetos. (...) Esto es el tipo de descripción en el que se piensa cuando se habla de una descripción física del «mundo exterior real», sean cuáles sean, por otra parte, las «partes elementales» (puntos materiales, campos, etc.) elegidos para elaborar esta descripción”¹⁹¹.

Dado que Einstein mantiene que la noción de objeto material, a pesar de ser un concepto más, libremente inventado¹⁹², ha de tener una

¹⁹¹ EINSTEIN, A., “Réflexions élémentaires concernant l’interprétation des fondements de la mécanique quantique” (1953). En: Quanta. Mécanique statistique et physique quantique, p. 252. La gran importancia que Einstein da a que una descripción física sea tal y como acaba de establecer queda fuera de toda duda cuando, a continuación, añade: “La légitimité de ce programme n’a pas été sérieusement mise en doute par les physiciens tant qu’il a semblé que tout ce qu’une telle description mettait en jeu pouvait, en principe, être établi empiriquement dans chaque cas particulier. Qu’il s’agisse là d’une illusion, Heisenberg fut le premier à le démontrer dans le domaine des phénomènes quantiques, d’une façon propre à convaincre les physiciens.

Dès lors, le concept de «réalité physique» est apparu comme problématique. La question s’est posée de savoir ce qu’il en est exactement de ce que la physique théorique cherche à décrire (à l’aide de la mécanique quantique) et à quoi se rapportent les lois qu’elle établit” (Ibid.).

¹⁹² Pero, si el concepto de objeto material es una libre creación de nuestra mente, cuya validez reside en el grado de comprensión que nos aporta de la experiencia y, por otro lado, tenemos que la concepción clásica de objeto (como un ente ondulatorio o corpuscular) no nos ayuda a comprender la realidad del mundo microfísico, entonces ¿por qué no deberíamos intentar construir un *nuevo* concepto de “objeto” que sí haga comprensibles los resultados experimentales de la mecánica cuántica? En realidad, en esta línea está la revisión que Bohr hace de este término al sustituirlo por el de “fenómeno”. No obstante, Einstein no admitirá tal cambio, dado que, dentro de su credo epistemológico, el concepto de “objeto” se ha de construir a partir de la noción de “realidad independiente”. Esto es muy importante porque, remitiéndome al principio de este trabajo, diferentes teorías dan a

existencia externa, es decir, una referencia directa con la realidad independiente, este concepto ha de construirse de tal forma que respete los requisitos de la descripción espacio-temporal. Gracias a la cual no sólo obtendríamos una descripción ostensiva; con ella, además, podríamos restaurar el carácter causal de los fenómenos y desafiar al indeterminismo y a la descripción estadística al ofrecer la posibilidad de localizar a los fenómenos espacio-temporalmente e independientemente de sus propiedades dinámicas.

“En resumen podríamos decir que para Einstein todo objeto físico consiste en un sistema individual no reductible a lo que conocemos de él a través de los procesos de observación y medida, que «tiene» magnitudes estrictamente determinadas y que ha de estar localizado en el espacio y en el tiempo, de lo que resulta su separabilidad o independencia de lo alejado espacialmente”¹⁹³.

De esta forma, Einstein canaliza su ataque a la mecánica cuántica a partir de un nuevo enfoque, el que le ofrece su credo epistemológico: aquélla no puede servir de fundamento a la física porque sus características están en contradicción con una posible teoría futura que sirva para explicar todo el mundo físico de una manera “global y sencilla”:

“La mayor parte de la investigación física está dedicada al desarrollo de las diversas ramas de la física, en cada una de las cuales el objeto es la comprensión teórica de campos de experiencia más o menos restringidos, y en cada una de las cuales las leyes y los conceptos permanecen unidos a la experiencia lo más estrechamente posible. (...)”

las mismas magnitudes físicas diferentes usos, pero son los conceptos físicos, desde el marco conceptual de la teoría, los que posibilitan los determinados tipos de usos que podemos hacer de las magnitudes físicas.

¹⁹³ RIOJA, A., “Einstein: el ideal de una ciencia sin sujeto”, *Revista de Filosofía*, nº 2, p. 105. Cuya conclusión es: “En definitiva, lo que convierte a «lo dado en las impresiones sensibles» en «objetos» es la atribución de un *principio de unidad y permanencia*, fruto del cual son las características mencionadas: posesión de propiedades o magnitudes con independencia de la observación, existencia continuada en el espacio-tiempo, separabilidad, etc. Pero no olvidemos que la atribución de dicho principio no tiene fundamento empírico sino que es obra del sujeto que forma libremente conceptos. Únicamente el producto de la razón es capaz de convertir las impresiones sensibles en objetos de conocimiento, sin los cuales, a su vez, no habría ciencia objetiva. Y esto ha de valer para los átomos o las partículas elementales como vale para los astros. De lo contrario la ordenación de las observaciones en el ámbito microfísico sería imposible, y con ello la propia teoría cuántica” (Ibid.).

Por otra parte, desde el comienzo mismo, siempre ha estado presente el intento de hallar una base teórica unificadora de todas estas ramas, que consista en un mínimo de conceptos y relaciones fundamentales, y de la que todos los conceptos y las relaciones de cada rama puedan ser derivados por un proceso lógico. A esto nos referimos al hablar de la búsqueda de un fundamento para toda la física¹⁹⁴.

Concretamente, dicha teoría tendría que ser una generalización de la relatividad general y, sin embargo, la ecuación de Schrödinger vuelve a introducir en la física el tiempo absoluto y la energía potencial¹⁹⁵, factores que la relatividad general había considerado inadmisibles, tal y como mostraré a continuación, en el próximo punto; además de la controvertida eliminación, por parte del método de Heisenberg, de las funciones continuas, de manera que también se habría de renunciar al continuo espacio-temporal y a una teoría de campo construida sobre la base de ecuaciones diferenciales parciales¹⁹⁶, lo cual es, precisamente, el fundamento de la nueva teoría, que Einstein persigue, como parte de su programa, para describir la realidad.

c) El “Programa maxwelliano” de Einstein: su alternativa física

La actitud de Einstein a partir de 1935 hacia la mecánica cuántica se caracteriza sobre todo por querer ofrecer una alternativa física a esta teoría. Pais resume esta actitud hacia aquella, o como él mismo lo llama “la esencia del pensamiento de Einstein sobre la teoría cuántica”, de la siguiente manera:

“1) La mecánica cuántica representa un importante avance, y sin embargo es solamente el caso límite de una teoría que está todavía por descubrirse: «No hay duda de que la mecánica cuántica se ha apropiado de un hermoso trozo de verdad, y que ha de ser la piedra de toque para

¹⁹⁴ EINSTEIN, A., “Los fundamentos de la física teórica” (1940), Mis ideas y opiniones, p. 292.

¹⁹⁵ La energía potencial en la ecuación de Schrödinger es lo que determina la velocidad de propagación de las ondas de probabilidad en un espacio de configuración (espacio de fase, caracterizado por 3n dimensiones).

¹⁹⁶ Cf. EINSTEIN, A., “Física y realidad” (1936), Mis ideas y opiniones, pp. 284-288 y 291. Este grupo de objeciones se basa, meramente, en la postura que siempre mantuvo acerca de cómo ha de ser el tipo de descripción física.

una futura base teórica, en la que debe ser deducible como caso límite a partir de esa base, así como la electrostática es deducible de las ecuaciones de Maxwell del campo electromagnético, o como la termodinámica es deducible de la mecánica estadística».

2) No se debe tratar de buscar la nueva teoría partiendo de la mecánica cuántica y tratando de refinarla o reinterpretarla: «No creo que la mecánica cuántica haya de ser el punto de partida en la búsqueda de esa base, así como no puede llegarse a los fundamentos de la mecánica partiendo desde la termodinámica o desde la mecánica estadística».

3) En cambio -y éste era el punto principal de Einstein- *habría que empezar todo de nuevo*, como si dijéramos, y tratar de obtener la mecánica cuántica como subproducto de una teoría general relativista, o de una generalización de ella. Empezar todo de nuevo nunca le había intimidado”.¹⁹⁷

Así fue, se propuso “empezar todo de nuevo”; pero no exactamente desde cero, pues el contenido del programa, que siguió para alcanzar tal objetivo, tres elementos indispensables, que he desglosado a modo de condiciones, para que la nueva teoría se ajuste al modelo filosófico de la ciencia, el cual construyó a partir de su credo epistemológico:

1) Retorno a la objetividad clásica y a la causalidad determinista, rechazando la forma estadística de la física cuántica como teoría última de la realidad atómica. Esta exigencia está contenida en el principio de relatividad, al cual propone como punto de partida de toda nueva teoría física futura.

2) El concepto de “campo” es propuesto como modelo explicativo de “todo lo real”, donde se incluye el mundo de los microfenómenos, sustituyendo la discontinuidad cuántica que introdujo el cuanto de acción y el concepto de partícula material, asumido por el atomismo mecanicista de Newton.

3) Recuperación de la descripción espacio-temporal como modelo objetivo y realista del tipo de representación que se ha de mantener en la descripción física de la realidad.

En estos tres puntos, que así he reconstruido, se concentra su programa, que él llamó “maxwelliano”. Antes de entrar a detallarlos, aclararé qué entiende Einstein por un “programa maxwelliano”, al cual distingue de un “programa clásico”.

¹⁹⁷ PAIS, A., El Señor es sutil... La ciencia y la vida de Albert Einstein, p. 462. (Las citas que incluye son del propio Einstein).

Einstein confiesa a Born en la carta 91, fechada en el año 1948, que, al buscar una nueva teoría física, no está defendiendo un retorno al *esquema clásico*, sino una teoría que, de acuerdo con la relatividad general, sea capaz de explicar la materia y la radiación sin ignorar la gravedad. En otra parte admite, claramente, que el programa que él propone es del estilo de la teoría de Maxwell, pues, aunque ésta forme parte de la física clásica, no asume todos los postulados de la mecánica (de Newton); la electrodinámica describe la realidad a través de ecuaciones diferenciales parciales y lo hace partiendo de la idea de continuidad que conlleva la noción de campo¹⁹⁸. Pero no a través de ecuaciones diferenciales totales, como hace la mecánica de Newton.

No obstante, este programa también contiene elementos de aquella mecánica, en lo que se refiere a la concepción del movimiento: el móvil sufre cambios continuos en sus coordenadas espacio-temporales, perfectamente definidas y de forma independiente con respecto a sus valores dinámicos. Este enunciado expresa lo que Bohr consideraba la *esencia de la física clásica* y a esto es a lo que se refiere cuando acusa de clásico al programa de Einstein, porque tanto la mecánica atomista de Newton como la teoría del campo electromagnético de Maxwell comparten ciertos postulados, ajenos a si usan ecuaciones diferenciales totales o diferenciales parciales. Éstos son los “postulados comunes entre energicistas y atomistas”, a los que se refiere de Broglie:

“En efecto, estaban de acuerdo para admitir la validez del cuadro abstracto del espacio y del tiempo, la posibilidad de poder seguir la evolución del mundo físico por medio de magnitudes bien localizadas en el espacio y continuamente variables en el transcurso del tiempo, la legitimidad de describir todos los fenómenos por conjuntos de ecuaciones diferenciales. (...) Las ecuaciones diferenciales (o a derivadas parciales) de la física matemática clásica tienen la característica común de permitir seguir rigurosamente toda la evolución de los fenómenos que describen si se suponen conocidos ciertos datos relativos a un estado inicial que corresponden a un valor particular del tiempo. (...) De este modo, la física clásica se representaba todo el universo físico como proyectado con precisión absoluta en el cuadro del espacio y del tiempo, y evolucionando según leyes de inexorable necesidad. Hacía abstracción completa de los medios empleados para llegar a conocer las distintas partes de este vasto mecanismo (...). Todas

¹⁹⁸ Cf. EINSTEIN, A., “La influencia de Maxwell en la evolución de la idea de realidad física” (1931), *Mis Ideas y Opiniones*, pp. 240-241.

estas representaciones descansaban esencialmente sobre las nociones clásicas de espacio y de tiempo”¹⁹⁹.

¿Acaso, no consiste en esto también el programa de Einstein? Sí y en este sentido, más amplio, se le puede calificar de “clásico”; pero Einstein restringe esta noción y lo distingue del “maxwelliano” porque éste no necesita el modelo corpuscular de la mecánica newtoniana; además Einstein reconstruirá dicho programa a partir de unas nociones de marco espacio-temporal y de campo distintas de las nociones clásicas. De esta forma, Einstein identifica el “esquema clásico” con el materialismo atomista del mecanicismo de Newton, al que opone el modelo de continuidad de la realidad física, propuesto por Maxwell:

“En este ámbito particular de la física teórica -la electrodinámica-, el campo continuo se convertía junto con al punto material, en representante de la realidad física. Este dualismo persiste aún hoy, por muy molesto que resulte para cualquier mentalidad ordenada. (...) Antes de Maxwell, los investigadores concebían la realidad física (...) como puntos materiales, cuyos cambios sólo consisten en movimientos que pueden formularse mediante ecuaciones diferenciales totales. Después de Maxwell, se concibió la realidad física como representada por campos continuos, que no podían ser explicados mecánicamente, que debían representarse mediante ecuaciones diferenciales parciales. Este cambio en la concepción de la realidad es el más profundo y fructífero que se ha producido en la física desde los tiempos de Newton; con todo, debemos admitir al mismo tiempo, que el programa no ha sido desarrollado aún en todas sus partes. Los sistemas satisfactorios de la física que a partir de entonces se han desarrollado representan compromisos entre estos dos esquemas, que por esta misma razón ofrecen un carácter provisional, lógicamente incompleto, a pesar de que han facilitado grandes adelantos en algunos de los aspectos investigados”²⁰⁰.

¹⁹⁹ DE BROGLIE, L., Las revelaciones de la microfísica, pp. 131-132.

²⁰⁰ EINSTEIN, A., “La influencia de Maxwell en la evolución de la idea de la realidad física” (1931), Mis ideas y opiniones, pp. 240-241. También menciona, brevemente, esta distinción entre teoría clásica y electrodinámica en “Remarks to the Essays Appearing in this Collective Volume”, p. 675 (SCHILPP, P.A., Albert Einstein: philosopher-scientist, vol. 2, pp. 663-688).

Con este programa, al margen de las imperfecciones y defectos que contiene la propia teoría de Maxwell²⁰¹, sí que se podría rescatar el determinismo y la noción clásica de realidad objetiva, ya que Einstein no confía en que otros métodos puedan conseguirlo. Ahora ya sabe que los intentos de Bohm, de Broglie y Schrödinger, por ejemplo, de buscar esto partiendo de una reinterpretación de los principios de la física cuántica serán siempre infructuosos²⁰², ya que parten del principio de superposición de la ecuación de Schrödinger, el cual implica, de por sí, la violación del principio de separabilidad. La razón es que dicha ecuación introduce el tiempo absoluto en física y esto implica una vuelta a la idea de simultaneidad absoluta, que, además, contradice el principio de relatividad: dos sucesos se producen simultáneamente a pesar de estar separados espacialmente por una gran distancia. He aquí una razón más para que Einstein rechazara la mecánica cuántica:

“La acción a distancia está excluida por la teoría especial de la relatividad de Einstein (que, dicho sea de paso, está bien corroborada experimentalmente). La relatividad especial entraña el principio de localidad. Si hubiera acción a distancia (incluso aunque no pudiera usarse esta acción para enviar señales), entonces la relatividad especial tendría que ser corregida y adaptada en consecuencia”²⁰³.

No obstante, Bohr ni siquiera trató el problema de la inseparabilidad como un hecho físico “real”, sólo lo concibió como una cuestión epistemológica relacionada con el problema de la medida; circunstancia que ya examiné. Einstein, al contrario, se lo tomó como una cuestión física que planteaba un problema “real”, cuya solución debía comenzar por eliminar el principio de superposición de toda teoría futura; pero, esto sólo puede conseguirlo la generalización de la gravitación en una teoría del campo unificado, construida mediante ecuaciones diferenciales que operan con funciones continuas del espacio²⁰⁴. Por ejemplo, el método

²⁰¹ Precisamente, uno de estos defectos es que Maxwell aún pretendía explicar mecánicamente los campos continuos de los fenómenos eléctricos y magnéticos, representados por las cuatro ecuaciones diferenciales parciales, que recogió en su doble sistema de ecuaciones.

²⁰² Cf. EINSTEIN/BORN, Correspondance. 1916-1955, carta 99 de Einstein, fechada el 12 de mayo de 1952, y comentario de Born, pp. 206-207.

²⁰³ POPPER, K.R., Teoría cuántica y el cisma en Física, p. 43.

²⁰⁴ “Mi opinión es que la actual teoría cuántica, con ciertos conceptos básicos fijos que en esencia están tomados de la mecánica clásica, representa una formulación óptima del estado

de Schrödinger tiene el carácter de una teoría de campo, que utiliza ecuaciones diferenciales, de las que se deducen los estados discretos; pero sólo tiene la apariencia y no el contenido, ya que, únicamente, expresa “variaciones «continuas» de las probabilidades de los posibles estados” y esto lo realiza a costa de renunciar a la causalidad estricta y a la posibilidad de una representación precisa del movimiento por parte de sus ondas²⁰⁵.

En lugar de esto, Einstein propone este programa de tipo maxwelliano, que se definiría así: “la descripción de la realidad física en términos de campos que satisfagan, sin singularidades, a ecuaciones diferenciales parciales”²⁰⁶. Estas ecuaciones, “libres de singularidades”, es decir, con soluciones regulares en todos los puntos del espacio de cuatro dimensiones, explicarían las propiedades de la materia desde una nueva teoría²⁰⁷, donde se habría eliminado de ella el principio de superposición que implica la ecuación de Schrödinger:

de cosas. Creo, sin embargo, que esta teoría no brinda un punto de partida útil para la futura evolución. He ahí el punto en el que mis expectativas difieren de las de la mayoría de los físicos contemporáneos. Ellos están convencidos de que los rasgos esenciales de los fenómenos cuánticos (variaciones aparentemente discontinuas y temporalmente no determinadas del estado de un sistema, cualidades simultáneamente corpusculares y ondulatorias de las formaciones energéticas elementales) no pueden explicarse mediante funciones continuas del espacio para las cuales son válidas ecuaciones diferenciales. Piensan también que por ese camino no se podrá comprender la estructura atómica de la materia y de la radiación y prevén que los sistemas de ecuaciones diferenciales que entrarían en consideración para una teoría semejante ni siquiera tienen soluciones que sean regulares (libres de singularidades) en todos los puntos del espacio de cuatro dimensiones. Pero ante todo creen que el carácter aparentemente discontinuo de los procesos elementales solamente puede representarse mediante una teoría en esencia estadística, en la cual las variaciones discontinuas de los sistemas quedan reflejadas en variaciones «continuas» de las probabilidades de los posibles estados”. EINSTEIN, A., Notas Autobiográficas, pp. 81-82.

²⁰⁵ “Sobre la base de esta teoría -la mecánica ondulatoria de Schrödinger- fue posible obtener una representación sorprendentemente buena de una inmensa variedad de hechos que, de otro modo, se mostraban incomprensibles por completo. Pero curiosamente, se fracasó en un punto: se comprobó que era imposible asociar con estas ondas movimientos precisos de los puntos de masa; y esto, después de todo, había sido el objetivo original de todo el esfuerzo”. EINSTEIN, A., “Los fundamentos de la física teórica” (1940), Mis Ideas y Opiniones, p. 300.

²⁰⁶ EINSTEIN, A., “La influencia de Maxwell en la evolución de la idea de realidad física” (1931), Mis ideas y opiniones, p. 241.

²⁰⁷ Cf. EINSTEIN, A., “Física y realidad” (1936) y “Los fundamentos de la física teórica” (1940), Mis ideas y opiniones, pp. 288-290 y p. 292, respectivamente.

“No pienso que se pueda llegar a una descripción de los sistemas individuales simplemente completando la teoría cuántica estadística actual. El principio de superposición y la interpretación estadística están indisolublemente unidos entre sí. Si se piensa que la interpretación estadística debe ser superada, no se puede conservar la ecuación de Schrödinger, en la cual la linealidad implica la «superposición» de «estados»²⁰⁸.

Insistiré en que el objetivo de Einstein fue este programa: describir la “realidad objetiva” por medio de “campos que satisfagan, sin singularidades, un conjunto de ecuaciones a derivadas parciales” y así fue como actuó en todas las teorías del campo unificado en las que trabajó a lo largo de su vida. Pues, él jamás buscó una adaptación, sin más, de los principios de la mecánica cuántica a los de la relatividad general y, por esto, rechazó siempre la teoría cuántica relativista de campos. En palabras de Pais:

«Ese programa» es únicamente de Einstein. Su punto principal es que no se debe comenzar aceptando los postulados de la cuántica como reglas primarias, para proceder luego a ajustar esas reglas a la relatividad general. Creía en cambio que debe partirse de una teoría clásica de campo, una teoría del campo unificado, y exigir que de esa teoría surjan las reglas cuánticas, como restricciones impuestas por la misma teoría»²⁰⁹.

Ahora comenzaré a diseccionar su programa. En relación con el primer punto, Einstein, frecuentemente, mencionó el principio de relatividad como el pilar básico a partir del cual se debía construir la nueva teoría:

“Estoy convencido de que la teoría basada sobre la estadística sigue quedándose, pese a sus enormes éxitos, en la superficie de las cosas, y

²⁰⁸ EINSTEIN, A., Quanta. Mécanique statistique et physique quantique, p. 233, carta de Einstein a Kupperman, fechada el 14 de noviembre de 1953. Einstein insistió a menudo en esta renuncia; otro ejemplo lo encontramos en *Réflexions élémentaires concernant l'interprétation des fondements de la mécanique quantique*: “Le fait que l'équation de Schrödinger, associée à l'interprétation de Born, ne conduise pas à une description des «états réels» d'un système individuel incite naturellement à rechercher une théorie qui ne soit pas soumise à cette limitation”. En: Quanta. Mécanique statistique et physique quantique, p. 255.

²⁰⁹ PAIS, A., El Señor es sutil... La ciencia y la vida de Albert Einstein, p. 464.

que es preciso apoyarse sobre el principio de la relatividad generalizada; es decir, la generalización de las ecuaciones de la gravitación en el vacío”²¹⁰.

El principio de relatividad consiste en lo siguiente: “*Las ecuaciones que expresan las leyes de la naturaleza deben ser covariantes con respecto a todas las transformaciones continuas de las coordenadas*”²¹¹. No obstante, Einstein usó este principio de muy variadas formas: desde un sentido físico, como el de la anterior definición, hasta un sentido epistemológico.

El sentido epistemológico de éste implica tanto un principio causal como un principio de objetividad; por ello los estudios que se han realizado sobre el principio de relatividad destacan uno u otro, de los aspectos que Einstein defendió, como elementos de la auténtica descripción física²¹². El motivo es el siguiente: si las leyes de la física deben ser independientes de todo sistema de referencia, también han de serlo del marco de referencia del observador; no existe ningún sistema de referencia privilegiado.

En este sentido, el principio de relatividad, escribe Merleau-Ponty, “*exige excluir de su contenido todo lo relativo a la particularidad del observador o pensador, o al menos poder distinguirlo explícitamente de la parte «objetiva» del contenido*”²¹³.

²¹⁰ EINSTEIN, A., Correspondencia con Michele Besso, carta 161 de Einstein a Besso, con fecha del 16 de agosto de 1949, p. 366.

²¹¹ EINSTEIN, A., “Acerca de la teoría de la gravedad generalizada” (1950), Mis ideas y opiniones, p. 314.

²¹² En concreto, me refiero a los trabajos de Margenau, Merleau-Ponty, Sachs y Paty, que iré citando a lo largo de la exposición.

²¹³ MERLEAU-PONTY, J., Albert Einstein. Vida, obra y filosofía, pp. 284. Un poco más abajo, concluye: “Como consecuencia de la exigencia de objetividad en el discurso científico, el principio de relatividad necesita poder discernir con seguridad aquello que es independiente de ese sistema particular dentro de todo el conjunto de resultados de medidas. Como ya hemos visto, los métodos matemáticos, que en parte fueron puestos a punto para satisfacer a las exigencias de la teoría de la relatividad, no sólo permiten mostrar los invariantes que resultan de un conjunto de medidas sino que, gracias a la covariancia de las ecuaciones, permiten que el cálculo nos haga saber qué otro conjunto de medidas describiría el mismo proceso o fenómeno si estuviese referido a otro sistema”. (Ibid, p. 285. El subrayado es mío).

También se suma a esta opinión Paty²¹⁴, quien además de afirmar que las ideas de objetividad y de invariancia no son sólo solidarias sino también inseparables, sentencia que ambas están gobernadas por «*un axioma fundamental*», que es la idea de una realidad independiente.

Sachs también encuentra este axioma fundamental en su lectura del principio de relatividad, del cual afirma que es una condición de objetividad que contiene, tácitamente, dos supuestos: uno de ellos es que las leyes de la naturaleza expresan un orden subyacente a toda manifestación de los fenómenos, tal que este orden obedece a una conexión causal, y el otro supuesto es que estas leyes se expresan en un lenguaje preciso, bien definido²¹⁵.

Tal condición de objetividad, contenida en el principio de relatividad, se opone claramente a la doctrina de Bohr del “actor-

²¹⁴ “... l'exigence d'objectivité entraîne la condition d'invariance, c'est-à-dire l'indépendance des lois et de leurs relations fondamentales par rapport à des systèmes de coordonnées que la nature ne distingue pas entre eux (en raison du principe de relativité). (...) La condition de covariance générale correspond à une revendication semblable, poussée plus loin encore: tout système de coordonnées exprime une situation subjective, liée à notre position d'observateur (ou de sujet épistémique), et une description véritablement objective des lois de la nature doit s'en affranchir. (...) Ces exigences sont évidemment gouvernées par l'idée d'une réalité indépendante, dont nous proposons la représentation, et dont Einstein parle comme d'un «axiome fondamental» de sa propre pensée”. (PATY, M., Einstein-Philosophe, pp. 440-441).

²¹⁵ “The first of these contingent assumptions is that there are laws of nature in the first place, laws that underlie the outward manifestations of matter. The second contingent assumption is that these laws may be comprehended and expressed with a language that is sufficiently rich that we would be able to make precise predictions and test them with accuracy. The first of these contingent assumptions implies that the universe is indeed characterized by an *underlying order* -in any of its domains, from *fermis* (and smaller) to *light-years* (and greater). When it is expressed in terms of cause and effect, the order that is referred to then signifies that for every effect of the universe (from the smallest to the largest) there must be a logically connected cause. It follows that, in principle, such a view rejects any acausal theory of matter, in any domain and in any degree. For example, it would be in conflict with the claim of a fundamental acausality in the measurement process in microphysics, according to the Copenhagen interpretation of atomic matter, discussed in the preceding chapter. The second tacit assumption, implicit in the principle of relativity, is that it should be possible for us to find a language that would express the laws of matter in a precise way. Recall that it was Galileo who argued that this must indeed be the case, and that «in order to read the great book of nature, one must learn the language of Mathematics». That is to say, from the point of view of physics, mathematics serves as a *tool*: it plays the role of a language whose only purpose in this context is to facilitate an expression of the laws of nature”. (SACHS, M., Einstein versus Bohr. The Continuing Controversies in Physics, pp. 169-171).

espectador”, donde sí existe un “sistema de referencia privilegiado” o “absoluto”, que es el aparato de medida del observador; lo cual introduce una asimetría entre los aparatos macroscópicos de observación y el objeto microfísico observado que contrasta con la simetría del principio de relatividad entre “el observador” y “lo observado”²¹⁶. No obstante, Sachs nos advierte que la simetría que implica la teoría de la relatividad requiere que el universo sea representado como sistema cerrado en un continuo espacio-temporal:

“Esta conclusión se sigue del principio de relatividad, el cual requiere que las leyes de la naturaleza sean totalmente objetivas (covariantes) con respecto a *continuas* (y continuamente diferenciables) transformaciones del lenguaje espacio-temporal de cualquier marco de referencia a lenguajes espacio-temporales de cualquier otro marco de referencia, a partir de lo cual se pueda comparar las formas de las leyes naturales. Así, vemos que, de acuerdo con el punto de vista de la mecánica cuántica, los elementos de la materia que se suponen fundamentales son ‘partes’ distinguibles, llamadas ‘partículas elementales’, mientras que los conceptos fundamentales de la representación de la materia como un continuo, de acuerdo con la teoría de la relatividad, son sus (infinitas variedades de) distinguibles manifestaciones (modos) de un continuo”.²¹⁷

Pero, además, para Einstein, el principio de relatividad también supone la validez del principio causal e incluso le añade una nueva condición a la causalidad: la invariancia de las leyes con respecto a todas las transformaciones espacio-temporales. De esta forma lo expresa Margenau:

“Observando que la ciencia tradicional imponía a las leyes de la naturaleza solamente el moderado requisito de la invariancia temporal, Einstein insistió sobre otras restricciones más rígidas, sobre la invariancia con respecto a las transformaciones en las cuales el observador pase de un sistema de referencia a otro: la teoría especial de la relatividad mantiene la invariancia con relación a sistemas *inerciales*, y la teoría general intenta conservarla para todas las transformaciones espacio-temporales. En el sentido más profundo, por lo tanto, la teoría

²¹⁶ Cf. *Ibid*, pp. 237-259.

²¹⁷ *Ibid*, pp. 240-241.

de la relatividad es un complemento natural del principio de causalidad y, de hecho, su realización final”²¹⁸.

A este respecto también se pronuncia Merleau-Ponty cuando afirma que Einstein, al menos en ciertos contextos, entendió, además, el principio de relatividad en otro sentido filosófico más restrictivo y diferente al de la objetividad de las leyes, usándolo “como un principio de interdependencia efectiva, causal, de todos los elementos constitutivos de la realidad, que implica la imposibilidad de plantear la existencia de ninguno de ellos independientemente de sus inevitables correlacionados y, por la vía de la consecuencia, la imposibilidad de dar cualquier tipo de privilegio a un sistema físico particular”²¹⁹.

Es en este sentido donde se ha de buscar la relación del principio de relatividad con el postulado de localidad. El principio de separabilidad espacial estaba bien fundado por razones físicas, constituía la base de su teoría de la relatividad especial y sobre él Einstein justificó su exigencia acerca de una realidad objetiva en el espacio y en el tiempo (y una realidad independiente, perfectamente descrita por la teoría a través de leyes deterministas). Si el principio de separabilidad espacial no fuera respetado por la física cuántica, no sólo atentaría contra la realidad objetiva del espacio-tiempo, además introduciría una anomalía causal que rompería el principio de relatividad: no podríamos plantear que las mismas leyes se conservaran covariantes con respecto a todos los cambios de coordenadas espacio-temporales porque habría una interacción instantánea entre sistemas alejados espacialmente que introducirían anomalías, o al menos, inversiones causales ajenas a la relatividad.

²¹⁸ MARGENAU, H., La naturaleza de la realidad física, p. 370.

²¹⁹ MERLEAU-PONTY, J., Albert Einstein. Vida, obra y filosofía, pp. 285-286. Y en la página siguiente concluye de esta manera: “... al final de su carrera, el principio de relatividad seguía conservando para Einstein un significado filosófico más esencial que el de una mera condición formal de objetividad en la expresión de las leyes físicas; su significado era que los elementos constituyentes de la realidad física, todavía imperfectamente determinados por la ciencia, sólo podrían ser concebidos dentro de su interdependencia, no teniendo existencia autónoma ninguno de ellos. Métrica y materia, materia y energía, campo y partículas, únicamente deben ser comprendidos en su interdependencia, y la expresión físico-matemática de las leyes del Universo no debe dejar que nada escape a esta interdependencia. Pero esa expresión sólo será posible si está basada en una descripción más precisa y más completa de la estructura de lo real, la que da el continuo espacio-temporal” (Ibid, p. 287).

No puede olvidarse que la linealidad del principio de superposición de la ecuación de Schrödinger introduce el tiempo absoluto y con él la posibilidad de las acciones instantáneas acausales a distancia, lo cual viola el principio de separabilidad espacial introduciendo una “no-localidad” que es incompatible con el principio de relatividad: el principio lineal de superposición de su ecuación implica una simultaneidad absoluta entre la causa y el efecto, introduciendo una anomalía causal incompatible con el principio de relatividad, en tanto que éste demanda una simetría entre objeto y sujeto, objetividad y un enlace causal no instantáneo²²⁰. Por esta razón, Einstein afirma que la nueva teoría ha de construirse sobre el principio de relatividad, el cual debe sustituir a este principio de superposición y eliminar el carácter absoluto de la constante de Planck. Así también lo reconoce un físico actual de la talla de Selleri:

“Si en el futuro tiene lugar un cambio en la teoría cuántica para deshacerse de la no-localidad, probablemente éste no será un cambio menor. Según vimos en un capítulo precedente, los responsables de los efectos no-locales son los vectores de estado del segundo tipo y su eliminación comportaría una modificación radical del principio de superposición, esto es, de la naturaleza lineal de las leyes cuánticas. Comoquiera que sea, esto implicaría muy probablemente la resolución automática del problema de la medida (ya no sería necesaria la reducción del paquete de ondas, que es el paso de una superposición a una mezcla de estados); también debería desaparecer los efectos no locales en sistemas sencillos, como los tratados en el segundo capítulo (la paradoja de de Broglie), dado que son, otra vez, consecuencia del principio de superposición”²²¹.

²²⁰ “The eigenvalue form of quantum mechanics (the ‘Hamiltonian form’) implies an absolute simultaneity of both the act of measurement of some physical quantity (cause) and the revealed measured quantity (effect). This is then incompatible with relative simultaneity, because of the predicted finite speed of propagation of interaction, linking the cause and the effect *in a nonzero time* (in any, arbitrarily chosen, inertial frame of reference). That is, with the Hamiltonian formulation of quantum mechanics, if the cause and effect (the act of measurement and the revealing of this measurement) are expressed simultaneously in one Lorentz frame, relativity theory predicts that they will not be represented as simultaneous events in other Lorentz frames. We see, then, that because of the role of measurement in quantum mechanics and its expression in Hamiltonian form, this theory is *manifestly* incompatible with the symmetry requirement of the theory of relativity, whenever the interaction of the apparatus and the measured micromatter is fully expressed, including the radiation that is transferred between them, when a ‘quantum jump’ occurs”. SACHS, M., Einstein versus Bohr. The Continuing Controversies in Physics, pp. 253-254.

²²¹ SELLERI, F., El debate de la teoría cuántica, p. 197.

He aquí el significado de la expresión utilizada por Heisenberg “Einstein no estaba dispuesto a permitir que le quitaran el suelo de debajo de sus pies”²²², o en palabras del propio Einstein: “... de mi edificio no quedaría, prácticamente, nada”²²³.

En efecto, “no quedaría nada”, puesto que la inseparabilidad cuántica entra en conflicto, precisamente, con todo aquello sobre lo cual Einstein edificó su carrera científica: -fenómenos descritos en el marco espacio-temporal; -covariancia de las leyes físicas; -relatividad de la simultaneidad e interconexión causal de los sistemas físicos mediatizada por la constante c , la velocidad límite de la luz, la cual elimina, supuestamente, el tiempo absoluto.

“Las contribuciones de Albert Einstein a la física tienden, sobre todo, a eliminar la acción a distancia y mostrar que es posible una descripción regular de los procesos físicos en el espacio y en el tiempo. (...) No es sorprendente que Albert Einstein se negase a aceptar la mecánica cuántica como una teoría del todo satisfactoria de los fenómenos atómicos justo por causa de este problema -el de la falta de separabilidad-. En una carta escrita a Max Born y fechada el 2 de diciembre de 1947, Einstein admite que la teoría contiene una considerable cantidad de verdad, pero añade: «Sin embargo no puedo creer seriamente en ella, porque la teoría no casa con el principio de que la física debe representar una realidad temporal y espacial libre de desmanes a control remoto»²²⁴.

En relación con su creencia en el principio de relatividad, sólo queda observar que obedecía al requisito de la simplicidad, que, adviértase, formaba parte de su “credo epistemológico”²²⁵. A partir de aquél edificó su

²²² HEISENBERG, W., Diálogos sobre física atómica, p. 102. La cita completa la recogí en otra nota.

²²³ He extraído esta expresión de la siguiente declaración de Einstein, que volveré a citar más adelante: “Admito, sin embargo, como perfectamente posible, que la física pueda no estar fundada sobre el concepto de campo, es decir, sobre elementos continuos. Pero entonces no quedaría de mi castillo en el aire -incluyendo la teoría de la gravitación- y tampoco de la física actual, prácticamente *nada*”. EINSTEIN, A./BESSO, M., Correspondencia con Michele Besso, carta 210 de Einstein, fechada el 10 de agosto de 1954, p. 448

²²⁴ SELLERI, F., El debate de la teoría cuántica, p. 196.

²²⁵ En 1954 Einstein escribe una carta a de Broglie, donde expresa lo siguiente: “The equations of gravitation were able to be discovered *only* on the basis of a purely formal

teoría de la relatividad y, sin embargo, a ésta tampoco podía considerarla una teoría completa, en virtud, precisamente, de este “credo epistemológico”, por las siguientes razones:

1- Porque, a pesar de estar conectada con la teoría de campo, aún no puede “evitar la introducción independiente de los puntos materiales y de las ecuaciones diferenciales totales”²²⁶.

2- Porque carece de una “estructura unificada del espacio”, la cual se debe introducir para subsanar la existencia de dos estructuras espaciales independientes, la métrico-gravitacional y la electro-magnética, presentes en la teoría de la relatividad general²²⁷.

3- Porque no da una explicación de la estructura atómica de la materia.

Las dos primeras razones hacen que el sistema axiomático y los elementos conceptuales básicos de la teoría sean mucho más complejos de lo que sería de desear según el principio lógico de economía presente en su “credo epistemológico”. Situación que viene a empeorar la última razón, ya que el no poder dar una explicación de la estructura atómica de la materia indica que dicho sistema axiomático y conceptual no es global y, por tanto, necesitaremos otro, en este caso el de la física cuántica, lo cual suscita un conflicto epistemológico entre ambos sistemas inaceptable para alguien que, como Einstein, persiga una concepción unitaria de la física. Con estas palabras lo resume él mismo:

“... no se puede aducir que estas partes de la teoría de la relatividad general, que hoy pueden ser consideradas definitivas, hayan aportado a la física una fundamentación completa satisfactoria. En primer lugar, el campo total aparece en ella compuesto por dos partes lógicamente inconexas, la gravitatoria y la electromagnética. Y en segundo término esta teoría, tal como las primeras teorías de campos, de momento no ha proporcionado una explicación de la estructura atómica de la materia.

principle (general covariance), that is to say, on the basis of the conviction that the laws of nature have the greatest imaginable simplicity”. DE BROGLIE, L., “Correspondance entre Albert Einstein et Louis de Broglie”, *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, 4 ,1979, p. 56. (Citado por: SACHS, M., Einstein versus Bohr. The Continuing Controversies in Physics, pp. 280-281).

²²⁶ Cf. EINSTEIN, A., “La influencia de Maxwell en la evolución de la idea de realidad física” (1931), Mis ideas y opiniones, p. 241. También en la misma obra: “Física y realidad” (1936), p. 281.

²²⁷ Cf. EINSTEIN, A., “El problema del espacio, el éter y el campo en la física” (1934), Mis ideas y opiniones, p. 256; o también, “Física y realidad” (1936), pp. 280, 288, y 291.

Este fracaso está, quizás, conectado con el hecho de que hasta el presente no haya contribuido en nada a la comprensión de los fenómenos cuánticos”²²⁸.

Ya me referí a que la validez del principio de relatividad, frente a los fundamentos de la física cuántica, tan bien corroborados experimental y teóricamente como el primero, además está arropada, por Einstein, con el manto de su credo epistemológico; pero, lo más destacable es que este principio sólo tiene validez si lo planteamos dentro del marco clásico de objetividad y causalidad. En pocas palabras, sobre el principio de relatividad no sólo construyó su teoría de la relatividad, sino que también era la estructura que sustentaba el marco realista de su propuesta epistemológica, ya que aquél implica:

“Una filosofía de la naturaleza que supone en las cosas un orden subyacente a las apariencias perceptivas, susceptible en principio de recibir una descripción físico-matemática adecuada en el sentido más riguroso del término, donde las relaciones causales deberían ser estrictamente reducibles a un encadenamiento lógico sin que ninguno de los elementos que intervienen en esas relaciones tenga prioridad sobre ningún otro en el orden del ser o del conocer, sin que ningún desgarramiento venga a romper la continuidad de lo que Einstein llamó «la alfombra cuatridimensional» en una carta fechada en enero de 1954”²²⁹.

De momento, ya tiene la primera parte del programa: la futura teoría ha de partir del principio de relatividad. Ahora bien, ante la consiguiente cuestión de cómo, entonces, hacer una teoría *completa* de la estructura y de los constituyentes atómicos de la materia y la radiación, Einstein propone buscar la respuesta en una teoría de campo: “funciones continuas en un continuo tetradimensional como conceptos básicos de la teoría”²³⁰, la cual tendrá que explicar la discontinuidad cuántica, subsumiéndola bajo un modelo de continuidad, a través de una generalización de su propia teoría de la relatividad general:

²²⁸ EINSTEIN, A., “Los fundamentos de la física teórica” (1940), Mis Ideas y Opiniones, p. 298.

²²⁹ MERLEAU-PONTY, J., Albert Einstein. Vida, obra y filosofía, p. 287.

²³⁰ Cf. EINSTEIN, A., “Remarks to the Essays Appearing in this Collective Volume”, p. 675. (SCHILPP, P.A., Albert Einstein: philosopher-scientist, vol. 2, pp. 663-688).

“La teoría que estamos buscando (...) debe ser una generalización de la teoría del campo gravitatorio. La primera pregunta es la siguiente: ¿cuál es la generalización natural de un campo de tensor simétrico? Esta pregunta no podrá ser contestada por sí misma, sino sólo en conexión con la otra pregunta: ¿qué generalización del campo proporcionará el sistema teórico más natural? La respuesta que sirve de fundamento a la teoría que aquí se discute afirma que el campo de tensor simétrico debe ser reemplazado por otro no simétrico. Esto significa que la condición $g_{ik} = g_{ki}$ para los componentes del campo ha de ser desechada. En tal caso, el campo tiene dieciséis en lugar de diez componentes independientes”²³¹.

En realidad, con esta teoría persigue dos fines consecutivos: primero, unificar el campo gravitatorio de la relatividad y el campo electromagnético de la teoría de Maxwell; en segundo lugar, a partir de esta generalización de los campos gravitatorios y electromagnéticos, dar una explicación de la materia que sustituya a la actual teoría, la física cuántica. En cuanto al motivo, que mueve a Einstein hacia este planteamiento de búsqueda de una nueva teoría basada en el continuo, es su credo epistemológico, que, como ya se ha visto, le guía hacia una búsqueda de la simplicidad conceptual y axiomática de toda la ciencia física²³². Por esto afirma:

²³¹ EINSTEIN, A., “Acerca de la teoría de la relatividad generalizada” (1950), Mis ideas y opiniones, p. 320. En otro lugar lo explicita, mencionando el principio de relatividad, de esta manera: “The theory of gravitation showed me that the non-linearity of these equations results in the fact that this theory yields interactions among structures (localized things) at all. But the theoretical search for non-linear equations is hopeless (because of too great variety of possibilities), if one does not use the general principle of relativity (invariance under general continuous co-ordinate-transformations). In the meantime, however, it does not seem possible to formulate this principle, if one seeks to deviate from the above program. Herein lies a coercion which I cannot evade. This for my justification. (...) The application of the formal basis of the general theory of relativity to the «microscopic» can, therefore, be based only upon the fact that tensor is the formally simplest covariant structure which can come under consideration. Such argumentation, however, carries no weight with anyone who doubts that we have to adhere to the continuum at all. All honor to his doubt - but where else is there a passable road?”. EINSTEIN, A., “Remarks to the Essays Appearing in this Collective Volume”, pp. 675-676, (SCHILPP, P.A., Albert Einstein: philosopher-scientist, vol. 2, pp. 663-688).

²³² “Es en el limitado número de campos y de ecuaciones simples que pueden existir matemáticamente donde descansa la esperanza del teórico de captar lo real en toda su profundidad”. EINSTEIN, A., “Sobre el método de la física teórica” (1933), Mis ideas y opiniones, p. 246. Y, en una carta dirigida a su amigo Besso, escribe: “Considero, a fin de cuentas, la física estadística, pese a todos sus éxitos, como una fase transitoria y tengo la

“Ecuaciones tan complejas como las del campo gravitacional sólo pueden hallarse a base de encontrar una condición matemática lógicamente sencilla que determine por completo, o casi por completo, las ecuaciones. Una vez que se dispone de esas condiciones formales suficientemente fuertes, se necesita muy poco conocimiento fáctico para establecer la teoría; en el caso de las ecuaciones de la gravitación son la cuatridimensionalidad y el tensor simétrico como expresión de la estructura del espacio los que, junto con la invariancia frente al grupo de transformaciones continuas, determinan casi por entero las ecuaciones.

Nuestra tarea es encontrar las ecuaciones del campo para el campo total. La estructura buscada tiene que ser una generalización del tensor simétrico. El grupo no puede ser más restringido que el de las transformaciones continuas de coordenadas”²³³.

Para llevar a cabo esta “teoría del campo único”²³⁴ y completar el programa, habría que utilizar ecuaciones diferenciales parciales, las cuales sólo se resuelven con funciones continuas; éstas constituirían una teoría de campo, que se erigiría como modelo explicativo de toda la realidad física, eliminando el carácter discreto de la actual teoría cuántica y restaurando tanto el determinismo físico como el ideal clásico de descripción objetiva, pero no el concepto de punto material y la localización exacta de éste; es decir, propone que el concepto de campo sea el modelo explicativo y representativo de toda la realidad física, incluida la materia.

En relación con este aspecto he de observar que si Einstein no pretende restaurar la localización exacta del punto material, el tipo de determinismo que él defiende no es el de la mecánica newtoniana. Es decir, no busca la determinación rigurosa de las trayectorias de las partículas, sino más bien que las leyes sobre la naturaleza de la materia, entendida como un continuo, predeterminen, independientemente de

esperanza de llegar a una teoría verdaderamente satisfactoria de la materia”. EINSTEIN, A./BESSO, M., Correspondencia con Michele Besso, carta 122 de Einstein, fechada el 16 de febrero de 1936, p. 294.

²³³ EINSTEIN, A., Notas Autobiográficas, p. 83-84.

²³⁴ Einstein construyó varias teorías de este tipo, pero ninguna alcanzó su objetivo; la última teoría del campo único que nos dejó la inició en el año 1945, dándole su forma definitiva ocho años después, en 1953. Cf. apéndice sobre “La teoría del campo único de Einstein”.

cualquier medición, las manifestaciones y el comportamiento del campo en su marco espacio-temporal continuo²³⁵.

Así pues, la única salida, viable para Einstein, de la situación en la que se encuentra la física es una nueva teoría, que englobe a la relatividad general y a la física cuántica, desde la que se explique tanto la gravitación como las propiedades de la materia a partir de la idea de continuidad. Por ello, la teoría ha de estar enfocada hacia una concepción de “campo único”. En este punto será fundamental tener en cuenta qué es lo que entiende Einstein por espacio-tiempo y cómo se plantea el problema de la descripción espacio-temporal, ya que para él va a ser muy importante que la física ofrezca una *imagen* de la realidad de este tipo (espacio-temporal), porque es la única manera que tenemos de justificar la arbitrariedad con la que la ciencia construye sus teorías:

“La ciencia no es sólo una colección de leyes, un catálogo de hechos sin mutua relación. Es una creación del espíritu humano con sus ideas y conceptos libremente inventados. Las teorías físicas tratan de dar una imagen de la realidad y de establecer su relación con el amplio mundo de las impresiones sensoriales. Luego, la única justificación de nuestras estructuras mentales está en el grado y en la norma en que las teorías logren dicha relación”²³⁶.

Esta actitud de Einstein se deriva de la concepción que tenía de la ciencia, tal y como se matizó más arriba, que no sólo se debe a la arbitrariedad de las creaciones científicas, sino también a su creencia en una

²³⁵ En el estudio de Sachs se lee esta explicación: “... the theory of relativity, as a theory of matter, implies that the laws of matter are totally *deterministic*. That is to say, the logical implication of this theory is that the laws of matter are fully predetermined, independent of measurements. But the determinism of general relativity theory as a theory of matter is not in terms of predetermined trajectories of the ‘particles’ of matter, as it is the Newtonian view. It is rather in terms of predetermined continuous fields, all mapped in the same space-time. That is to say, the ‘determinism’ in the sense of a relativistic field theory of matter does not single out the trajectories of singular particles, deterministically parameterized with a time measure for each of them. In the relativistic field theory, ‘determinism’ refers to all aspects of a closed system that are coupled in a totally objective way, independent of any measurements that may or may not be carried out. It is the full coupling of the closed system that is predetermined, though not only in terms of a ‘time’ measure, but rather in terms of a full set of logical and mathematical (geometrical, algebraic and topological) relations between the interdependent field components that underlie its basic description”. (SACHS, M., Einstein versus Bohr. The Continuing Controversies in Physics, p. 246).

²³⁶ EINSTEIN, A./ INFELD, L., La física, aventura del pensamiento, p. 250.

armonía estructural entre el mundo y las teorías. Según sus propias palabras:

“Con la ayuda de las teorías físicas tratamos de encontrar nuestro camino por el laberinto de los hechos observados; ordenar y entender el mundo de nuestras sensaciones. Desearíamos que los hechos observados resultaran consecuencia lógica de nuestro concepto de la realidad. Sin la creencia de que es posible asir la realidad con nuestras construcciones teóricas, sin la creencia en la armonía interior de nuestro mundo, no podría existir la ciencia. Esta creencia es, y será siempre, el motivo fundamental de toda creación científica. A través de todos nuestros esfuerzos, en cada una de las dramáticas luchas entre las concepciones viejas y nuevas, se reconoce el eterno anhelo de comprender, la creencia siempre firme en la armonía del mundo, creencia continuamente fortalecida por el encuentro de obstáculos, siempre crecientes hacia su comprensión”²³⁷.

Dicha armonía en las estructuras de ambos es la responsable de que la teoría contenga *elementos objetivos*, o como los llama Einstein, “factores objetivos”²³⁸. Así también lo entiende Selleri:

“En distintas ocasiones, Einstein declaró que la física es una creación del intelecto humano en su intento por comprender el mundo físico. Esta es, en esencia, una definición dialéctica de la física: en tanto *creación* del intelecto humano una teoría física es, ciertamente, arbitraria en parte (desde un punto de vista *lógico*); en cuanto comprensión del mundo físico, en la medida en que tenga éxito, debe a su vez contener elementos objetivos, y ésta es la conquista irreversible que puede y debe enriquecerse por la investigación futura, pero jamás negada o abandonada”²³⁹.

Pues bien, según la concepción de Einstein, uno de estos *elementos objetivos* es el marco espacio-temporal, como probaré a continuación, el

²³⁷ *Ibid*, p. 252.

²³⁸ Cf. EINSTEIN, A., “Remarks to the Essays Appearing in this Collective Volume”, en: SCHILPP, P.A., Albert Einstein: Philosopher-Scientist, pp. 673.

²³⁹ SELLERI, F., El debate de la teoría cuántica, p. 49.

cual constituye la tercera condición para llevar a buen término su programa²⁴⁰.

d) El marco espacio-temporal y el concepto de campo

Primeramente, dada la tesis que Einstein defiende acerca del origen y la formación de los conceptos, para indagar en el significado físico de los conceptos de espacio y de campo, como de cualquier otro, se ha de seguir su desarrollo científico: desde el momento en que más unido estaba a nuestras experiencias sensitivas hasta su creciente complejidad, que tiende a la abstracción.

De esta forma, el concepto de “espacio”, en función de los hechos de la experiencia y de una mayor perfección de la teoría que lo acogía, ha ido evolucionando con la Ciencia Física, desligándose de los aspectos superfluos hasta dar con las características más genuinas de éste como elemento objetivo de la realidad. Por esta razón, antes de entrar en la idea que Einstein tenía de “espacio” y de “campo”, seguiremos el trazado histórico, sugerido por él mismo en más de una ocasión²⁴¹.

²⁴⁰ La siguiente declaración de Einstein confirma mi postura, la tesis que mantengo en este trabajo: “We represent the sense-impressions as conditioned by an «objective» and by a «subjective» factor. For this conceptual distinction there also is no logical-philosophical justification. But if we reject it, we cannot escape solipsism. It is also the presupposition of every kind of physical thinking. Here too, the only justification lies in its usefulness. We are here concerned with «categories» or schemes of thought, the selection of which is, in principle, entirely open to us and whose qualification can only be judged by the degree to which its use contributes to making the totality of the contents of consciousness «intelligible». The above mentioned «objective factor» is the totality of such concepts and conceptual relations as are thought of as independent of experience, viz., of perceptions. So long as we move within the thus programmatically fixed sphere of thought we are thinking physically. Insofar as physical thinking justifies itself, in the more than once indicated sense, by its ability to grasp experiences intellectually, we regard it as «knowledge of the real». EINSTEIN, A., “Remarks to the Essays Appearing in this Collective Volume”, en: SCHILPP, P.A., *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, pp. 673-674. Aunque en este texto no lo menciona, Einstein se dio cuenta que, para salir del pragmatismo científico y poder abogar por esas categorías, ha de aportar una justificación filosófica de éstas: tales elementos o factores objetivos han de estar basados en una intuición, que, para Einstein, es la espacial; aquellos responden a nuestra forma de ordenar el material sensible, que, como él mismo admite, de alguna forma han de estar conectados con la realidad física.

²⁴¹ Por ejemplo, estas ideas de Einstein, acerca de la evolución del concepto de espacio, se hallan en: “El problema del espacio, el éter y el campo, en la física” (1934), *Mis ideas y opiniones*, p. 250-256. También puede consultarse “La relatividad y el problema del espacio” (1950), pp. 332-341, en la misma obra.

Este proceso, dice el propio autor de la relatividad, tuvo una primera fase en la cual se asoció el espacio al objeto material, más tarde se le identificó con las relaciones espaciales de estos objetos, para acabar definiéndole desde la noción de “intervalo”. No obstante, su verdadero contenido no empezó a desvelarse hasta que Descartes no lo introdujo como un *continuo geométrico de tres dimensiones*, donde se podía localizar un punto mediante un esquema de coordenadas. Posteriormente, Newton, para definir la aceleración de un móvil, atribuyó al espacio un carácter rígido, pasivo, independiente y absoluto:

“Así, hubo de agregarse a la realidad geométrica del concepto de espacio una nueva función determinadora de la inercia del espacio. (...) Su efecto inercial era concebido como autónomo, o sea, como no influenciado por ninguna clase de circunstancia física; el espacio, pues, afectaba a las masas pero, por su parte, no era afectado por nada”²⁴².

Pero, esta concepción fue superada, en parte, por la teoría ondulatoria de la luz y por el electromagnetismo, cuando hizo su aparición el concepto de “campo”, entendido, de una manera muy general, como “una magnitud (o bien un conjunto de magnitudes) que es función de las coordenadas y del tiempo”, con lo cual perdió parte de su independencia. Aunque, dentro de la física clásica, sólo se trataba de “un concepto auxiliar en casos en los que la materia era tratada como un continuo”²⁴³; es decir, se

²⁴² EINSTEIN, A., “El problema del espacio, el éter y el campo, en la física” (1934), Mis ideas y opiniones, p. 251.

²⁴³ EINSTEIN, A., “La relatividad y el problema del espacio” (1950), Mis ideas y opiniones, p. 333. En otra parte, Einstein explica con las siguientes palabras la imperfección de la teoría de Maxwell: “La introducción del campo como un concepto elemental dio origen a una inconsistencia de la teoría como conjunto. La teoría de Maxwell, aunque describa de manera adecuada el comportamiento de las partículas con carga eléctrica en su interacción mutua, no explica el comportamiento de las densidades eléctricas, es decir, que no proporciona una teoría de las partículas en sí misma. Por consiguiente, éstas deben ser tratadas como puntos de masa sobre la base de la antigua teoría. La combinación de la idea de un campo continuo con la de los puntos materiales discontinuos en el espacio parece inconsistente. Una teoría de campo consistente” -ésta es la que Einstein persigue- “requiere una continuidad de todos los elementos de su teoría, no sólo en el tiempo, sino también en el espacio, y en todos los puntos del espacio. De aquí que la partícula material no tenga lugar como concepto fundamental en una teoría de campo. O sea que, incluso más allá del hecho de que la gravedad no esté comprendida en ella, la electrodinámica de Maxwell no puede ser considerada una teoría completa”. EINSTEIN, A., “Acerca de la teoría de la gravedad generalizada” (1950), Mis ideas y opiniones, p. 312.

utilizó sólo para describir un estado de la materia en forma de fenómenos electromagnéticos y fenómenos luminosos y esto a costa de introducir un sustrato material, el éter.

A continuación, y a partir de la teoría de Lorentz, la relatividad especial eliminó el éter y convirtió al concepto de campo en un elemento fundamental de la realidad física, tal y como declara Einstein en el siguiente texto:

“Al revelar la equivalencia física de todos los sistemas inerciales, la teoría de la relatividad especial demostró el carácter insostenible de la hipótesis de un éter en reposo. Por consiguiente, fue necesario renunciar a la idea de que el campo electromagnético debe ser considerado como el estado de un portador material. Por esta vía, el campo se convirtió en un elemento irreducible de la descripción física, irreducible en el mismo sentido en que lo era el concepto de materia en la teoría de Newton”²⁴⁴.

Cuando esto ocurrió, la noción de “campo” se introdujo en el *espacio vacío*, sustituyéndolo, y, así, se pudo *atribuir funciones o estados físicos al espacio mismo*; de ahí que *los campos sean los estados físicos del espacio*. Para calcular el campo como estado físico del espacio se necesitó utilizar un nuevo instrumento matemático: se trata del *cálculo tensorial*, o, como lo bautizó su fundador, Gregorio Ricci, “cálculo diferencial absoluto”, donde un tensor es un tipo de función que contiene las cuatro variables: las tres coordenadas del espacio y del tiempo; este método matemático fue, finalmente, desarrollado por Tullio Levi-Civita (1873-1941) para poder, gracias a él, manejar diferentes tipos de campos.

En concreto, el tipo de campo que utiliza la relatividad general (“al menos para un caso especial”, aclararía Einstein) es un campo de tensor simétrico, que adquiere la siguiente forma: $g_{ik} = g_{ki}$, la cual nos informa del carácter matemático del campo gravitatorio, siendo los campos gravitatorios aquellos campos g_{ik} simétricos²⁴⁵.

El propósito de Einstein es, claramente, erradicar el modelo atomista de la mecánica de Newton en favor de una teoría sólo de campos continuos.

²⁴⁴ EINSTEIN, A., “La relatividad y el problema del espacio” (1950), Mis ideas y opiniones, p. 336.

²⁴⁵ A partir de aquí, dice Einstein que si nos preguntamos por el tipo de “campo general covariante que puede ser postulado para un campo de tensor simétrico, la respuesta ya estaba en la teoría métrica de superficies de Gauss y Riemann: las ecuaciones diferenciales que pueden ser postuladas como leyes de campo para g_{ik} deben ser por lo menos de segundo orden, es decir, que deben contener, al menos las segundas derivadas de g_{ik} con respecto a

Sin embargo, Einstein en la relatividad especial aún usa los métodos de la geometría euclídea para medir las posiciones de los observadores en un sistema inercial dado y seguirá haciéndolo hasta la primavera de 1912²⁴⁶. En realidad “el espacio cuatridimensional de la teoría de la relatividad restringida es tan rígido y absoluto como lo fuera en su momento aquel espacio concebido por Newton”²⁴⁷. Aún más, en la conferencia titulada “La relatividad y el problema del espacio” da una explicación detallada de este estadio, correspondiente a las aportaciones de la relatividad restringida, para concluir así:

“De este modo, como en la mecánica clásica, el espacio es también un componente independiente en la representación de la realidad física. Si imaginamos que la materia y el campo han sido eliminados, el espacio inercial o, para decirlo con mayor exactitud, ese espacio junto con su correspondiente tiempo, permanecerá. La estructura cuatridimensional (espacio de Minkowski) es considerada portadora de la materia y del campo. Los espacios inerciales, junto con sus correspondientes tiempos, no son más que sistemas cuatridimensionales de coordenadas

las coordenadas. En el caso de suponer que en las leyes de campo no aparecen órdenes mayores que el de las segundas derivadas, aquéllas están matemáticamente determinadas por el principio de la relatividad general. El sistema de ecuaciones puede ser escrito en la forma: $R_{ik} = 0$. Las R_{ik} se transforman del mismo modo que las g_{ik} , o sea, que también forman un tensor simétrico.

Estas ecuaciones diferenciales sustituyen por completo la teoría de Newton del movimiento de los cuerpos celestes, a condición de que las masas estén representadas como singularidades del campo. En otras palabras: esas ecuaciones contienen al mismo tiempo las leyes de fuerza y las leyes del movimiento, y quedan eliminados los «sistemas inerciales».

El hecho de que las masas aparezcan como singularidades indica que estas masas en sí mismas no pueden ser explicadas por campos g_{ik} simétricos, o «campos gravitatorios». Ni siquiera el hecho de que existen sólo masas gravitatorias «positivas» puede ser deducido de esta teoría. Evidentemente, una teoría relativista de campos completa debe estar basada en un campo de naturaleza más compleja, es decir, en una generalización del campo de tensor simétrico”. EINSTEIN, A., “Acerca de la teoría de la relatividad generalizada” (1950), Mis ideas y opiniones, p. 318.

²⁴⁶ Einstein publicó dos trabajos sobre gravitación (en: *Annalen der Physik*, n° 38, 355, 1912 y *Annalen der Physik*, n° 38, 443, 1912), escritos en febrero y marzo, que precedieron a su trabajo completo sobre la relatividad general. En ellos encontramos que el tiempo es *curvo*, pero el espacio es aún *plano*. Cf. PAIS, A., El Señor es sutil... La ciencia y la vida de Albert Einstein, pp. 209-213.

²⁴⁷ La cita interna entrecomillada pertenece a: EINSTEIN, A., “El problema del espacio, el éter y el campo, en la física” (1934), Mis ideas y opiniones, p. 253, (véase también las páginas 251 y 252).

privilegiados que están enlazados entre sí por las transformaciones lineales de Lorentz. En razón de que en esta estructura cuatridimensional ya no existen secciones que representen el «ahora» en forma objetiva, los conceptos de ocurrencia y de devenir no están por completo en suspenso, pero resultan complicados. Por lo tanto parece más natural considerar la realidad física como un ente cuatridimensional y no, como se ha hecho hasta ahora, como la *evolución* de un ente tridimensional”²⁴⁸.

Sin embargo, y a pesar de este avance, continua diciendo Einstein:

“Este espacio rígido de cuatro dimensiones de la teoría de la relatividad especial es, hasta cierto punto, un análogo cuatridimensional del éter tridimensional rígido de Lorentz. También para esta teoría es válida la siguiente enunciación: la descripción de los estados físicos postula al espacio como dado inicialmente y como dueño de una existencia independiente”²⁴⁹.

El salto cualitativo en la determinación de este concepto no se produjo hasta la relatividad general y la concepción geométrica de Riemann, la cual cambió el concepto newtoniano de espacio rígido, independiente y absoluto por la concepción de un espacio activo y participativo de los efectos que sobre él producen la materia y los fenómenos físicos que en él acontecen, es decir, a este espacio le afecta la presencia y el comportamiento físico de la materia. El espacio ya no tiene una existencia separada y la geometría del mundo físico ya no es una geometría euclídea ni inmutable, pues sus características dependen de la presencia de masas, la cual afecta al movimiento de los objetos materiales y con ello a la configuración geométrica del espacio²⁵⁰:

²⁴⁸ EINSTEIN, A., “La relatividad y el problema del espacio” (1950), Mis ideas y opiniones, pp. 337.

²⁴⁹ *Ibid.*

²⁵⁰ “In the general theory of relativity the mass distribution determines the equations of motion of bodies. The distribution of the moving matter in turn determines the geometry. However, this geometry *changes* constantly according to the changing mass distribution. The material bodies move according to the geometry that is determined by them. In so doing they change the mass distribution, and hence also the geometry. Thus, we have to deal with the mutual interdependence of space, time and motion, as suspected by philosophy and verified by physics”. HÖRZ, H., “Philosophical concepts of space and time”. In: FRENCH, A.P., Einstein. A centenary volume, p. 233.

“En razón de que el campo gravitatorio está determinado por la configuración de las masas y de sus correspondientes cambios, la estructura geométrica de ese espacio también depende de factores físicos. Es decir que, de acuerdo con esta teoría -y tal como lo había conjeturado Riemann- el espacio ya no es absoluto: su estructura depende de influencias físicas. La geometría (física) ya ha dejado de ser una ciencia encerrada y completa en sí misma, como lo era la geometría de Euclides”²⁵¹.

Aún más, en un fragmento de la conferencia de Kyoto, que Einstein dio en diciembre de 1922, citado por Pais, se leen afirmaciones, aún más reveladoras, sobre cómo se dio la transición de la geometría euclídea de la teoría especial a la geometría riemanniana de la general:

“Si todos los sistemas (acelerados) son equivalentes, la geometría euclidiana no puede valer en todos ellos. Tirar la geometría y quedarse con las leyes (físicas) equivale a describir pensamientos sin palabras. Hay que buscar las palabras antes de poder expresar los pensamientos. Y, en este caso, ¿qué debemos buscar? El problema se mantuvo insoluble para mí hasta 1912, cuando bruscamente me di cuenta de que la teoría de las superficies de Gauss tiene la llave para abrir ese misterio. Me di cuenta de que las coordenadas de superficie de Gauss tienen un significado profundo. Sin embargo no sabía entonces que Riemann había estudiado los fundamentos de la geometría de una manera todavía más profunda. (...)Me di cuenta de que los fundamentos de la geometría tienen significación física. (...) De modo que pregunté a mi amigo (Grossmann) si el problema podía ser resuelto con la teoría de Riemann, es decir, si los invariantes del elemento de línea podían determinar completamente las cantidades que yo estaba buscando”²⁵².

Hasta aquí se llega con la teoría de la relatividad general, pero Einstein va más allá en el desarrollo del concepto de “espacio” y, aunque se respeta el cambio cualitativo que ofreció esta teoría, no se da por satisfecho y propone una *estructura unificada del espacio*, de la cual, no sólo se deduzca, de manera directa, la existencia del campo gravitacional, como ocurre en la relatividad general, sino también la del campo electromagnético:

²⁵¹ EINSTEIN, A., “El problema del espacio, el éter y el campo, en la física” (1934), Mis ideas y opiniones, p. 256.

²⁵² PAIS, A., El Señor es sutil... La vida y la obra de Albert Einstein, p. 218.

“Es verdad que la gravitación había sido deducida de la estructura del espacio, pero además del campo gravitacional existe el campo electromagnético. En primer lugar, éste debió ser introducido en la teoría como una entidad independiente de la gravitación. Hubo que agregar a las ecuaciones fundamentales de campo unos términos que dieran cuenta de la existencia del campo electromagnético. Pero resulta intolerable para el espíritu teórico la idea de que existan dos estructuras espaciales que sean independientes la una de la otra, la métrico-gravitacional y la electro-magnética. Uno se siente impulsado a creer que ambos tipos de campos corresponden a una estructura unificada del espacio”²⁵³.

Siguiendo el camino que recorrió Einstein a través del concepto de espacio, queda perfilada la noción que él, propiamente, defendió de éste: el espacio no es absoluto, es decir, independiente de la materia, pues ésta ejerce su influencia sobre él y aquél no existiría si pudiéramos *vaciarlo* de su contenido material; es dinámico, pues, al espacio se le pueden atribuir funciones, de las que los campos son las responsables, proporcionándole diferentes estados físicos; su naturaleza es la de un continuo cuatridimensional, ya que tampoco podemos separar el espacio del tiempo si queremos que conserve un valor objetivo²⁵⁴, que, además, tiene una curvatura variable y está topológicamente “distorsionado”, ya no es ni plano ni rígido. Dado que el espacio se define como campo, porque éste es el estado físico del espacio, el modelo de continuidad ha de ser el que explique toda la realidad incluido el concepto de partícula²⁵⁵.

Una vez que ya está definido el concepto de espacio y el de campo, ahora es posible diseccionar en tres puntos la actitud que mantuvo Einstein

²⁵³ EINSTEIN, A., “El problema del espacio, el éter y el campo, en la física” (1934), Mis ideas y opiniones, p. 256.

²⁵⁴ “La realidad física del espacio está representada por un campo cuyas componentes son funciones continuas de las cuatro variables independientes: las coordenadas de espacio y tiempo. Es precisamente esta clase particular de dependencia lo que expresa el carácter espacial de la realidad física”. EINSTEIN, A., “Acerca de la teoría de la relatividad generalizada”(1950), Mis ideas y opiniones, p. 315.

²⁵⁵ “Dado que la teoría de la relatividad general implica la representación de la realidad física mediante un campo «continuo», el concepto de partículas o puntos materiales no puede desempeñar un papel fundamental como tampoco lo puede hacer el concepto de movimiento. La partícula sólo puede aparecer como una región limitada del espacio en la que la fuerza del campo o la densidad de energía son particularmente elevadas”. *Ibid*, p. 315.

en relación con los conceptos descriptivos que se basan en las propiedades espacio-temporales:

1) Einstein no admite ningún cuestionamiento de las nociones de espacio y tiempo, ya que su concepción de “realidad física” descansa en la necesidad de la separabilidad espacial entre los sistemas físicos.

2) En virtud del punto 1, tampoco admitirá que la descripción espacio-temporal haya alcanzado su ocaso en la física, aunque, ciertamente, no identifica a aquélla con la localización puntual de una teoría corpuscular (atomismo materialista), puesto que él, de manera opuesta, defiende una teoría de campo, que es de naturaleza continua.

3) En relación con los dos puntos anteriores, Einstein tampoco compartirá con Bohr su interpretación fenoménica de estas propiedades físicas de la materia; en concreto, para Einstein el espacio y el tiempo son reales, pues la descripción espacio-temporal (aunque el sistema de coordenadas varíe de un sistema físico a otro en el que la gravedad es distinta) es imprescindible tal cual es, sobre todo, en tanto que el marco espacio-temporal es una propiedad de la estructura del campo²⁵⁶. Es decir, el espacio-tiempo tiene realidad si se entiende como un marco de naturaleza continua y *no* independiente de la acción que la masa (materia, gravedad) ejerce sobre él. Por este motivo, Einstein le otorga una significación objetiva al espacio a partir de su unión con el tiempo en la teoría de la relatividad:

²⁵⁶ “Sobre la base de la teoría de la relatividad general, por otra parte, el espacio, por oposición a «lo que llena el espacio» que depende de las coordenadas, no tiene existencia separada. Es decir, que un campo gravitatorio puro podría haber sido descrito en términos de las g_{ik} (como funciones de las coordenadas), mediante la solución de las ecuaciones gravitatorias. Si imaginamos que el campo gravitatorio, es decir, las funciones g_{ik} , es eliminado, ya no quedará un espacio del tipo (1),” {Einstein se refiere al espacio métrico: $ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 - dx_4^2$ } “sino absolutamente «nada», ni siquiera un «espacio topológico». Y esto porque las funciones g_{ik} describen no sólo el campo, sino también -y al mismo tiempo- las propiedades estructurales topológicas y métricas de la variedad. Un espacio del tipo (1), juzgado desde el punto de vista de la relatividad general, no es un espacio sin campo, sino un caso especial del campo g_{ik} para el cual -para el sistema de coordenadas que se haya utilizado que, en sí mismo no tiene significación objetiva- las funciones g_{ik} tienen valores que no dependen de las coordenadas. No existe algo que se pueda determinar espacio vacío, es decir, un espacio sin campo. El espacio-tiempo no reivindica para sí una existencia propia, sino que reclama la categoría de cualidad estructural del campo. (...) Hace falta la idea de campo como representante de la realidad, en combinación con el principio de la relatividad general, para mostrar cuál era el verdadero meollo de la idea de Descartes: no existe espacio «vacío de campo». EINSTEIN, A., “La relatividad y el problema del espacio” (1950), Mis ideas y opiniones, pp. 339-340.

“La significación objetiva del espacio y del tiempo se encuentra, en primer lugar, en el hecho de que el «continuum» tetradimensional es hiperbólico; de modo que, a partir de cualquier punto, existen líneas «temporales» y líneas «espaciales», es decir, líneas para las cuales $ds^2 > 0$, y otras para las cuales $ds^2 < 0$. Las coordenadas x_r no poseen «en sí» carácter espacial o temporal. Se puede, a fin de conservar nuestros hábitos de pensamiento, dar la preferencia a los sistemas para los cuales se tiene en todas partes: $g_{44} \cdot dx_4^2 > 0$, $g_{11} \cdot dx_1^2 + 2g_{12} dx_1 dx_2 \dots g_{33} dx_3^2 < 0$.

Sin embargo, no hay que atribuir ninguna justificación objetiva a tal elección. El carácter «espacial» o «temporal» es pues real. Pero no se puede decir que, «por naturaleza», una coordenada sea temporal y las otras sean espaciales”²⁵⁷.

Por tanto, el espacio no es absoluto pero sí real, ya que sirve de principio diferenciador o separador de los sistemas físicos y, en consecuencia, no es una propiedad que surja con la interacción observacional, sino que *pre-existe* como una propiedad real (objetiva) de los objetos al margen de si son, o no, observados y sometidos a medición.

Sin embargo, según los preceptos de la complementariedad, los procesos independientes (individuales) no son descriptibles, ya que no son fenómenos; la física cuántica sólo *aplica las propiedades espacio-temporales* a conjuntos de individuos, dado su carácter estadístico. Las propiedades mecánicas espacio-temporales sólo surgen bajo estas condiciones y no cuando tratamos con procesos individuales. Einstein piensa que tal concepción es inadmisibles para la ciencia; las propiedades espacio-temporales son reales y, en consecuencia, se han de poder emplear tanto en las consideraciones estadísticas como en los procesos individuales. Ésta es la diferencia irreconciliable entre el realismo de Einstein y el fenomenismo de Bohr. Ahora bien, desde este planteamiento, el problema vuelve a ser irresoluble, por ello volveré a abordarlo más adelante, pero

²⁵⁷ EINSTEIN, A., Correspondencia con Michele Besso (1903-1955), p. 134, carta 27 de Einstein, con fecha del 31 de octubre de 1916. Especificaré que un ds^2 es un “invariante” con carácter absoluto, que establece que “las distancias espaciales entre dos puntos cualesquiera son numéricamente iguales, cualquiera que sea el sistema de coordenadas escogido para situarlos” (*Ibid*, p. 124).

desde la perspectiva del contenido intuitivo, ya que parece la única capaz de aportar una salida a tal encrucijada²⁵⁸.

Pero volviendo a Einstein, la condición anterior, que establece acerca de las propiedades espacio-temporales empleadas tanto en procesos complejos como individuales, la encontramos en su teoría del campo único, sobre la que trabajó durante sus últimos cincuenta años, desde 1905²⁵⁹. Einstein nunca dejó de preguntarse sobre la realidad de los cuantos de luz y de buscar una teoría, basada en el principio de relatividad y que partiera de una generalización las ecuaciones del campo gravitatorio, para explicar los estados discretos de los constituyentes de la materia a partir del modelo de continuidad. Sin embargo, al final de su vida tuvo que reconocer sus dudas acerca de las posibilidades de realización de tal programa, aunque ya de joven lo había entrevistado:

“Tú has captado de manera totalmente correcta los inconvenientes relacionados con el continuo. Si el punto de vista molecular concerniente a la materia es correcto (apropiado), es decir, si una parte del mundo debe estar representado por un número finito de puntos móviles, entonces el continuo de la teoría actual conlleva una multitud demasiado grande de posibilidades. Yo estoy igualmente persuadido de que esta multitud demasiado grande tiene su origen en el hecho de que nuestros medios actuales de descripción encuentran un escollo en teoría de los *quanta*. La cuestión me parece que es ésta: cómo formular los enunciados relativos a la discontinuidad sin haber recurrido a un continuo (el espacio-tiempo); esto último debería ser exclusivo de la teoría, en tanto que es una construcción adventicia que no justifica la esencia del problema ni corresponde a nada de lo “real”. A este respecto, nosotros carecemos, cruelmente, del formalismo matemático adecuado. ¡Cuántas veces esta cuestión no me ha tenido atormentado!”²⁶⁰.

Al margen de esta *flaqueza* de Einstein, lo destacable, de todo este proceso de búsqueda por encontrar una teoría de campo unitario, es que él

²⁵⁸ Cuando exponga esta idea se verá que dicha solución consiste en averiguar si en física cuántica existe un puente entre la teoría y la realidad, se tendría que admitir con Bohr que estas propiedades espacio-temporales son fenoménicas y, así, se hallaría un argumento más a favor de la completud de la teoría cuántica y, con ello, del realismo moderado de la complementariedad frente al positivismo y al idealismo que Einstein le atribuyó.

²⁵⁹ Cf. Apéndice: “La teoría del campo único de Einstein”.

²⁶⁰ EINSTEIN, A., *Quanta. Mécanique statistique et physique quantique*, carta de Einstein a Dällenbach, fechada en noviembre de 1916, p. 232.

siempre trabajó en ella sobre la base de que la evolución de la física debía explicar los rasgos de la física cuántica desde funciones continuas con ecuaciones diferenciales parciales²⁶¹. La razón de esto está en que Einstein busca “una representación exhaustiva de la realidad física sobre la base del continuo”²⁶².

No obstante, si se admite la definición de Einstein acerca del “campo” como un continuo cuatridimensional, cuyas coordenadas espaciales no tienen por qué ser rectilíneas y euclidianas, pues su curvatura es variable, entonces el espacio sólo puede ser entendido como un orden de coexistencia de un tipo u otro, que dé cabida a todas las diferentes estructuras topológicas del universo. De esta forma, la intuición espacial que propone Einstein no se corresponde con el tipo de visualización que nos permite la geometría euclídea, sino que incluye cualquier forma de representación espacio-temporal, como desarrollaré en el próximo capítulo.

En definitiva, Einstein no admite que la mecánica cuántica sea una teoría completa por el modo que tiene de describir la realidad, lo que él llama una “descripción indirecta”. Es decir, lo que rechaza, en realidad, es el giro epistemológico que propone Bohr desde su filosofía de la complementariedad y que es asumido por la mayoría de los físicos. Einstein no cree necesario renunciar, como propone la filosofía de Bohr, a describir la realidad tal cual es en sí misma sin la intervención del sujeto; considera que esta renuncia a “un poco de realismo” no sólo está injustificada y es innecesaria²⁶³, sino que también es contraria a su “instinto científico”, es decir, a su concepción epistemológica sobre la realidad física²⁶⁴. Dar una validez objetiva a la interpretación estadística, o a su

²⁶¹ Cf. EINSTEIN, A., Notas Autobiográficas, pp. 81-87.

²⁶² “Creo que estas ecuaciones representan la generalización más natural de las ecuaciones de la gravitación². La comprobación de su utilidad física es una tarea extraordinariamente difícil, porque no sirven las aproximaciones. La cuestión es: ¿qué soluciones libres de singularidades en todo el espacio tienen estas ecuaciones?”. EINSTEIN, A., Notas Autobiográficas, p. 87; en la nota 2 hace la siguiente declaración: “Opino que la teoría aquí propuesta tiene bastantes probabilidades de confirmarse si el camino de una representación exhaustiva de la realidad física sobre la base del continuo resulta transitable”. Declaraciones parecidas pueden encontrarse también en: “Sobre el método de la física teórica” (1933), Mis Ideas y Opiniones, pp. 246-247.

²⁶³ Es innecesaria porque Einstein opina que la teoría de la relatividad aún plantea la posibilidad de seguir una vía que lleve, a través de la generalización del concepto de campo, a restaurar el tipo de descripción que él llama “directa y exhaustiva” de la realidad.

²⁶⁴ Einstein resume la situación con las siguientes palabras: “Il ne semble pas faire de doute que les physiciens qui tiennent la description donnée par la mécanique quantique pour

equivalente, el principio de indeterminación, es contrario a su “instinto científico”, esto es, al criterio de realidad, y si Einstein acepta la interpretación estadística de ψ es porque piensa que tal interpretación apoya su postura de rechazo hacia las implicaciones epistemológicas de la física cuántica como reales y definitivas.

No obstante la condición de completud con la que se decide si una teoría es completa se basa en el criterio de realidad y aquella expresión de Einstein, “no tiene realidad física”, ya supone la validez absoluta de este criterio de realidad que se defiende en el artículo, pero dentro del marco de la complementariedad la frase no tendría sentido o bien precisaría muchas matizaciones, pues, en este caso, la localización espacio-temporal tendría tanta, o tan poca, realidad física como la que le otorga su carácter de fenómeno físico, en el sentido que le da Bohr. Lo mismo puede decirse de la posterior argumentación de Einstein sobre la “realidad simultánea de ambas magnitudes” y de la expresión “si sin perturbar el sistema”; respecto a esto último, Bohr subraya que en las circunstancias propias de la física cuántica no hay una perturbación del sistema, sino:

“... una influencia sobre las mismas condiciones que definen los posibles tipos de predicciones relativos al comportamiento futuro del sistema. Ya que esas condiciones constituyen un inherente elemento de la descripción de cualquier fenómeno, al cual el término “realidad física” puede ser propiamente asignado, vemos que la argumentación de los mencionados autores no justifica su conclusión acerca de que la descripción mecánico-cuántica sea esencialmente incompleta. Por el contrario, esta descripción, como se manifiesta de la discusión precedente, puede ser caracterizada como una utilización racional de todas las posibilidades de interpretación inambigua de las mediciones, compatibles con la finita e incontrolable interacción entre los objetos y los instrumentos de medida en el campo de la teoría cuántica. De hecho,

définitive en son principe réagiront à ces considérations de la façon suivante; ils laisseront tomber l'exigence II d'une existence autonome de la réalité physique présente en différentes portions de l'espace; ils peuvent invoquer à bon droit le fait que la théorie quantique en fait nulle part explicitement usage de cette exigence.

Dont acte, mais je note ceci: lorsque je considère les phénomènes physiques que je connais, y compris ceux que la mécanique quantique a étudiés avec tant de succès, je ne trouve nulle part de fait qui me fasse paraître vraisemblable que l'on veuille abandonner l'exigence II. Aussi suis-je enclin à croire que, en vertu de Ia, l'on doit considérer la description indirecte de la réalité, destinée à être remplacée plus tard par une description exhaustive et directe”. EINSTEIN/BORN, Correspondance. 1916-1955, carta 88 de Einstein, fechada el 5 de abril de 1948, p. 188.

es únicamente la exclusión mutua de cualquiera de los dos procedimientos experimentales, que permiten la definición inambigua de las cantidades físicas complementarias, lo que proporciona el espacio para nuevas leyes físicas, la coexistencia de las cuales podría a primera vista parecer irreconciliable con los principios básicos de la ciencia. Esto es justo aquella enteramente nueva situación en tanto referida a la descripción de los fenómenos físicos, que la noción de complementariedad aspira a caracterizar”²⁶⁵.

Así, se ve con claridad que los criterios, de los que parten ambos, son diametralmente opuestos: Einstein sólo discute la situación en términos de “realidad objetiva”; en cambio, la primera premisa de Bohr es fenomenista, es decir, parte de la inseparabilidad en la interacción observacional entre el aparato y el objeto observado. ¿A qué tipo, si es que es posible alguno, de representación y de contenido físico de la teoría nos lleva esta concepción de Bohr acerca del tipo de descripción física, que únicamente se puede dar de la realidad, si ha quedado excluida la representación de los objetos como entes autónomos en el espacio y en el tiempo objetivos?

A mi juicio, todo lo dicho hasta ahora justifica que esta pregunta es la que mejor define el sentido de la Polémica Einstein-Bohr, de la manera más rigurosa o exacta y más fiel o justa al pensamiento de ambos autores. Por consiguiente, el contenido del siguiente capítulo será el análisis crítico de la polémica desde este punto de vista, como una discusión acerca de los inconvenientes y las respuestas a la cuestión acerca de si la mecánica cuántica es completa en el sentido de si tiene, elementos objetivos, que son los que determinan el contenido intuitivo.

e) Conclusión. El realismo espacial de Einstein

La piedra angular de la discrepancia entre Einstein y Bohr es que parten de dos principios epistemológicos diferentes. El de Einstein consiste en que *la realidad se compone de objetos autónomos perfectamente localizados en el espacio-tiempo*. Si esto puede adjudicarse a todas las magnitudes, incluidas las canónicamente conjugadas, entonces éstas son reales si tienen valores espacio-temporales bien definidos, que no pueden alterarse sin una causa física. Este punto de partida, proporcionado por su

²⁶⁵ *Respuesta de Bohr*, pp. 231-232.

criterio ontológico, encuentra su justificación en el principio de separabilidad espacial entre los sistemas físicos, como un principio con validez universal y absoluta. Es decir, el criterio ontológico establece la restricción que ha de cumplir la *descripción física*, “directa” y “completa”, de la realidad; es el requisito de la “condición de completud”. Aunque, a su vez, aquél se sustenta sobre el principio de separabilidad o postulado de localidad.

Si bien es cierto que en 1930, tras las Conferencias Solvay, Einstein reconoció que la mecánica cuántica era “completa” en cuanto a su desarrollo matemático, pero, dado que no quedó satisfecho, a partir de entonces profundizó en el análisis y el significado del término “completa” y propuso otros criterios para aplicar dicho término a una teoría física. Así pues, terminó admitiendo que la mecánica cuántica era una teoría matemáticamente *acabada dentro de los límites de las relaciones de Heisenberg*; de ahí, que fuera *todo lo “completa” que una teoría estadística del tipo clásico* puede llegar a ser; pero, al ser así, concluye que es una teoría fenomenista y superficial. Su objetivo, a partir de entonces, será completarla con “variables ocultas” aún desconocidas para la teoría actual. Por esta razón, en 1935 diseña el experimento EPR para demostrar que han de existir estas variables, con las que eliminar las relaciones de incertidumbre. Tal experimento se basa en la indiscutible necesidad de mantener, también en el nivel cuántico, el postulado de localidad. Con ello, pretende probar la *posibilidad de transgredir aquellos límites y completar la teoría cuántica con factores deterministas*: causalidad “fuerte” y descripción espacio-temporal.

Por lo tanto, se ve que, durante esta etapa, Einstein aún pretendía *completar* el núcleo teórico de la mecánica cuántica, eliminando las relaciones de indeterminación: su carácter estadístico y la introducción del dispositivo experimental en la descripción del fenómeno; pero, conservando la validez del contexto experimental del cuanto de acción: las leyes empíricas y los fenómenos descubiertos en el nivel cuántico y explicados por h .

Para justificar tal objetivo, Einstein distingue entre teoría “completa”, “consistente” y “correcta”: en una teoría correcta hay acuerdo entre sus conclusiones teóricas y los resultados de los experimentos y es consistente si carece de contradicciones lógicas en su estructura matemática. La mecánica cuántica es ambas cosas; pero, según el argumento EPR, no es completa porque existen elementos de la realidad física que no tienen su contrapartida en la teoría cuántica y tales elementos reales existen porque podemos darles valores bien definidos, sin perturbar

el sistema físico. Pero, la legitimidad de este argumento depende de que se cumpla la “condición de completud” y el “criterio de realidad”, los cuales se fundamentan y están en función de la validez física del principio de separabilidad espacial entre los sistemas; hecho que no se pone en duda en el experimento ideal de EPR: esto es lo que falsa la tesis sobre la completud de la mecánica cuántica; si se dudara de este principio físico, el argumento de EPR caería por falta de fundamentación.

De esta forma, queda establecido que una descripción completa es una descripción “directa” de la realidad, la cual implica tres factores: una representación espacio-temporal, una descripción objetiva (independiente) y una predictibilidad causal (leyes deterministas). Pero tales rasgos dependen, todos ellos, de la noción de realidad del criterio de Einstein: *la realidad se compone de objetos autónomos perfectamente localizados en el espacio-tiempo.*

Gracias a este requisito Einstein puede concluir que la mecánica cuántica es una descripción indirecta porque la información que contiene Ψ no es acerca de la realidad, sino de nuestro conocimiento sobre ella, y es incompleta porque, al ser estadística, sólo puede considerarse válida cuando se aplica a un conjunto de sistemas y no a uno individual. De ahí que identifique “indirecta” con “incompleta”, pues la teoría cuántica no describe las propiedades espacio-temporales de los sistemas individuales: si sólo describe la probabilidad de una pluralidad de sistemas, su carácter estadístico tiene sentido, en tanto que se trataría de una estadística de tipo clásico, es decir, con un carácter subjetivo que sólo afecta a la manera cómo conocemos esa realidad; pero no a la realidad en sí: Einstein defiende que el indeterminismo cuántico es gnoseológico.

Bohr no está de acuerdo: podría considerarla *indirecta* en tanto que las leyes físicas versan sobre nuestro *conocimiento de la realidad*; pero esto es así porque las *propiedades*, con las que la describimos, son *fenoménicas* y no “reales” (en el sentido clásico de Einstein, como sinónimo de “objetivas”), esto es, no le pertenecen a la realidad en sí, independiente de la observación y medida. Sin embargo, no es incompleta porque también su descripción (estadística) es válida para un sistema físico individual, pero, el cual está en un estado físico “real” indeterminado porque las magnitudes que definen tal estado sólo surgen con la interacción observacional (fenoménicas); de ahí que el indeterminismo sea físico y no gnoseológico.

Por este motivo, la respuesta de Bohr al artículo EPR ataca directamente al criterio de realidad y va dirigida a demostrar que este criterio contiene una “esencial ambigüedad” que le incapacita como requisito para decidir la completud de la descripción cuántica; a cambio,

expone su filosofía de la complementariedad, la cual sí puede aportar un criterio racional, libre de ambigüedades, para juzgar su completud. Los argumentos de Bohr, para defender esto, los diseccioné en seis puntos, que pueden resumirse de la siguiente manera. La descripción de la mecánica cuántica no puede juzgarse incompleta sobre la base de un criterio de realidad que no tiene en cuenta la característica básica y esencial de la realidad atómica: la individualidad del cuanto de acción. La premisa de Bohr es que éste es un hecho fundamental en la naturaleza y por ello se ha de sustituir el antiguo principio epistemológico, defendido por Einstein, por otro que sí la contemple: su doctrina del actor-espectador. Toda la interpretación de Bohr gira en torno al postulado cuántico y de éste extrae el criterio racional para decidir la completud de una descripción de la realidad física: este criterio es el de la “inambigüedad de la información” en la descripción complementaria. Es el mismo para decidir si es una descripción objetiva.

En EPR se critica las relaciones de indeterminación; Bohr responde con su interpretación epistemológica porque considera que aquéllas son su expresión cuantitativa. Dicho planteamiento de EPR lleva a Bohr a enfocar su polémica con Einstein desde la dicotomía determinismo-indeterminismo para lograr una teoría realista, porque éste, además, otorga a dichas relaciones un significado meramente gnoseológico o subjetivo. En cambio, para Bohr, el indeterminismo es físico, formando parte esencial de la naturaleza; su significado es objetivo: no pertenece a nuestro conocimiento.

Por lo anterior, y dada esta postura de Bohr, me pareció importante distinguir el uso lingüístico entre “probabilidad” e “indeterminismo”: el término “probabilidad” ha de aplicarse cuando se refiere al carácter y la naturaleza de las leyes científicas (que tratan sobre nuestro conocimiento de la realidad), por ello se podría decir que la probabilidad es subjetiva y gnoseológica; pero el término “indeterminismo” se ha de usar cuando nos refiramos a la propia naturaleza, pues éste es objetivo y físico: pertenece a la realidad física, pues en ella no existe un espacio-tiempo bien definido cuando lo conjugamos con el momento y la energía.

Las probabilidades pertenecen a nuestro conocimiento, de ahí que las leyes cuánticas sean estadísticas; pero la naturaleza está indeterminada, lo cual es la causa de lo anterior. Por tanto, si la física cuántica es completa dentro de los límites del principio de Heisenberg (como reconoció Einstein) y si esta indeterminación es real, física, objetiva y no subjetiva ni gnoseológica, entonces Bohr puede concluir que es completa en todo su sentido. Fuera de estos límites no daríamos con una descripción física de la

realidad; sólo describiríamos una idealización clásica mecanicista de la naturaleza. A cambio de aceptar el indeterminismo de las relaciones de Heisenberg, éstas nos ofrecen, según Bohr, la posibilidad de seguir usando sin ambigüedades la terminología clásica, con la que poder tener una descripción con contenido físico-intuitivo de los fenómenos cuánticos. Pero esta idea contradice el criterio de realidad de Einstein, por ello, éste sólo les concede un valor subjetivo: una teoría ha de describir el comportamiento de los sistemas físicos como objetos autónomos, perfectamente localizados en el espacio-tiempo.

El significado objetivo de las relaciones supone la aceptación, según Einstein, de los “estados potenciales” y las “acciones fantasmas a distancia”, que rompen el principio de separabilidad espacial entre los sistemas físicos. Pero, según la interpretación de Bohr, Einstein se equivoca en esto y no tiene esas implicaciones. En sus discusiones, Einstein tergiversó las ideas de Bohr y éste no concedió un valor físico al problema de la inseparabilidad: para Bohr era un problema epistemológico relacionado con el nuevo concepto de observación y con su teoría de la medición cuántica; en cambio, para Einstein se trataba de un problema físico porque, en su concepción de la ciencia física, el marco espacio-temporal no es fenoménico, sino real, objetivo, en todo su sentido.

La última opción depende de si se ha atribuido un carácter subjetivo al principio de indeterminación y la primera si el carácter es objetivo: si el indeterminismo es de la naturaleza, entonces no existen, al margen de las observaciones, el espacio y el tiempo objetivos, y si éstos no son objetivos, desaparecen los motivos por los que se puede considerar un problema físico a la inseparabilidad; en cambio, si el indeterminismo es sólo gnoseológico, entonces el espacio-tiempo es objetivo y la supuesta violación es una cuestión física que tiene unas consecuencias inaceptables para la física y que nos inclinan a favor de la localidad.

Pero, tales consecuencias tampoco tendrían razón de ser si se concibe la inseparabilidad cuántica como un problema sólo epistemológico, sin efectos físicos. Por esto, en la respuesta de Bohr a EPR, no hay ninguna referencia explícita al aspecto físico del principio de separabilidad (que tan importante era para Einstein) y sólo se refiere al problema epistemológico de la medida.

En definitiva, a partir de 1935, cuando Bohr demostró a Einstein que la mera aparición de h anulaba la validez del punto de partida del realismo clásico y aceptó que el primero tenía razón en esto, siguió apostando por el realismo de este tipo, al tiempo que tuvo que rechazar la

validez del cuanto de acción; así se inició la última etapa en su pensamiento y crítica.

El nuevo ataque de Einstein a la completud de la mecánica cuántica se caracteriza por apelar a las razones estéticas de una concepción racionalista de la ciencia, donde las teorías son construcciones especulativas (en contra del positivismo), pero con un valor cognoscitivo, o contenido de verdad, de tal construcción (en contra del instrumentalismo), el cual está en función de la finalidad de ofrecer un sistema axiomático y conceptual lo más sencillo posible para toda la Física, desde el que coordinar y ordenar la totalidad de las experiencias sensoriales (racionalismo contra fenomenismo). El “sentimiento cósmico religioso” justifica la relación entre la realidad objetiva y nuestras construcciones teóricas porque supone la creencia en un universo ordenado y matemático, gracias a la cual se pueden construir leyes naturales sobre él. Éste es el postulado para salir de la arbitrariedad de su “racionalismo especulativo”: la ciencia es una creación de la razón, en tanto elemento ordenador del material sensible en la formación de los conceptos y leyes físicas; por lo tanto, necesita postular la necesidad de una correspondencia entre lo racional y lo empírico, la teoría y la experiencia, los conceptos y las propiedades reales de los objetos.

Este racionalismo le lleva a defender una noción de objeto físico (material) que, para que tenga su correlato extralingüístico en la realidad, ha de construirse a partir de principios racionales que suponen su individualidad, distinguibilidad y localidad. Pero, tales rasgos sólo son defendibles si están inscritos en un marco espacio-temporal objetivo, respetando los requisitos de la descripción espacio-temporal. Por esta razón, su programa consiste en buscar otra teoría, sustituta, donde no se renuncie al continuo espacio-temporal.

Los elementos epistemológicos con los que Einstein construye aquello que debe ser la base conceptual de la ciencia son los siguientes. Los conceptos son “libres invenciones de la razón”, pero adquieren sentido, o contenido empírico, a través de la experiencia, la cual se ha de inscribir siempre dentro de los límites del marco espacio-temporal (la experiencia se ha de ajustar a las imposiciones de la razón, a elementos racionales), para que los objetos puedan disfrutar de una existencia autónoma y la descripción física se refiera a los estados reales de los sistemas. De modo que si los conceptos de una teoría física no se refieren a los objetos autónomos localizados en el espacio y en el tiempo, entonces están vacíos de contenido físico. Por lo tanto, la descripción mecánico-cuántica es incompleta porque carece de veracidad, o contenido, ya que, para Einstein,

no tiene conexión (para Bohr sí la tiene, pero de otro tipo) con el resto de las teorías ni con la totalidad de la experiencia; es decir, con los conceptos clásicos que son los únicos capaces de describir aquella experiencia, gracias a su doble carga, empírica y teórica, que es la que posibilita la conexión.

De esta forma, Einstein canaliza su ataque a la mecánica cuántica a partir de un nuevo enfoque: el que le ofrece su credo epistemológico. Aquella no puede servir de fundamento a la física porque sus características están en contradicción con una posible teoría futura que sirva para explicar todo el mundo físico de una manera “global y sencilla”. Concretamente, dicha teoría tendría que ser una generalización de la relatividad general y, sin embargo, la ecuación de Schrödinger vuelve a introducir en la física el tiempo absoluto y la energía potencial, factores que la relatividad general había considerado inadmisibles; además, de la controvertida eliminación, por parte del método de Heisenberg, de las funciones continuas, de manera que también se habría de renunciar al continuo espacio-temporal y a una teoría de campo construida sobre la base de ecuaciones diferenciales parciales, lo cual es, precisamente, el fundamento de la nueva teoría que Einstein persigue como parte de su programa, para describir la realidad.

Distingue su “programa maxwelliano” del “programa clásico” en el sentido de no proponer un retorno al materialismo atomista del mecanicismo de Newton; en su lugar, defiende el modelo de continuidad de la realidad física, dado por Maxwell. Dicho programa lo he desglosado en tres elementos o condiciones que la nueva teoría ha de cumplir para que se ajuste al modelo construido a partir de su “credo epistemológico”: 1) retorno a la objetividad y al determinismo, que está contenido en su principio de relatividad; 2) concepto de “campo” como modelo explicativo de lo “real”, en oposición a la discontinuidad del cuanto de acción; 3) recuperación de la descripción espacio-temporal como modelo objetivo y realista del tipo de representación que se ha de mantener en la descripción física de la realidad.

De modo que la validez del principio de relatividad es justificada por Einstein desde su credo epistemológico; pero, lo más destacable es que este principio sólo tiene validez si es planteado dentro del marco clásico de objetividad y causalidad; de modo que sobre el principio de relatividad no sólo construyó su teoría de la relatividad, sino que también era la estructura que sustentaba al marco realista de su propuesta epistemológica: si las leyes físicas deben ser independientes de todo sistema, también ha de serlo del marco de referencia del observador; por tanto, dada esta simetría, entre aparato y objeto, que impone el principio de relatividad, el Universo ha de ser representado como un sistema cerrado en un continuo espacio-temporal,

lo cual implica la validez absoluta del postulado de localidad, cuya violación no sólo atenta contra la objetividad y el realismo del espacio-tiempo, también introduce una anomalía causal que rompe el principio de relatividad; por ello, la nueva teoría ha de edificarse sobre este principio, el cual debe sustituir al principio de superposición de estados y eliminar el carácter absoluto de la constante de Planck.

La inseparabilidad cuántica entra en conflicto con todo aquello sobre lo que Einstein construyó su carrera científica: 1-fenómenos descritos en el marco espacio-temporal; 2-covariancia de las leyes físicas; 3-relatividad de la simultaneidad (rechazo del tiempo absoluto); y 3-interconexión causal de los sistemas físicos mediatizada por la constante c , velocidad límite de la luz.

De momento, ya tiene la primera parte de su programa: la nueva teoría ha de partir del principio de relatividad. En cuanto al segundo elemento (hacer una teoría “completa” de la estructura y de los constituyentes atómicos de la materia y de la radiación), propone buscar la respuesta en una teoría de campo: “funciones continuas en un continuo tetradimensional como conceptos básicos de la teoría”, la cual tendrá que explicar la discontinuidad cuántica, subsumiéndola bajo un modelo de continuidad, a través de una generalización de su propia teoría de la relatividad general (generalización de la teoría del campo gravitatorio).

La armonía estructural entre el mundo y las teorías es la responsable de que la teoría contenga “elementos objetivos”, o como los llama Einstein, “factores objetivos” y, según la concepción de Einstein, basada en el principio de separabilidad, uno de estos elementos objetivos son las propiedades espacio-temporales del marco continuo, el cual constituye la tercera condición para llevar a buen término su programa. Pero, dada su tesis acerca del origen y la formación de los conceptos, para indagar en el contenido o significado de los conceptos de espacio y de campo, se ha de seguir su evolución y desarrollo científico: desde el momento en que estaba más unido a nuestras experiencias sensitivas hasta su creciente complejidad, que tiende a la abstracción.

Tras realizar un breve recorrido sobre la evolución científica de tales nociones físicas, llegué a la concepción de Einstein: se sustituye el espacio rígido, independiente y absoluto por un espacio activo y participativo de los efectos que sobre él producen la materia y los fenómenos físicos que en él acontecen, es decir, a este espacio le afecta la presencia y el comportamiento físico de la materia. El espacio ya no tiene una existencia separada y la geometría del mundo físico ya no es una geometría euclídea ni inmutable, pues sus características dependen de la

presencia de masas, la cual afecta al movimiento de los objetos materiales y, con ello, a la configuración geométrica del espacio. Hasta aquí se llega con la relatividad general en el concepto de “espacio”. Pero, Einstein va más allá al proponer una “estructura unificada del espacio”, de la cual no sólo se deduzca directamente la existencia del campo gravitacional, como ya ocurre en la relatividad general, sino también la del campo electromagnético.

En resumen, el espacio no es absoluto (no es independiente de la materia); también es dinámico, pues los campos le proporcionan diferentes estados físicos; además, es de naturaleza continua cuatridimensional (para conservar un valor objetivo, pues el espacio sólo no lo es); por último, tiene una curvatura variable y está topológicamente “distorsionado”: ya no es plano ni rígido. Dado que el espacio se define como campo, porque éste es el estado físico del espacio, el modelo de continuidad ha de ser el que explique toda la realidad, incluido el concepto de partícula.

Ahora, ya se puede diseccionar su actitud respecto a los conceptos descriptivos que se basan en las propiedades espacio-temporales, la cual determina la tercera condición para construir su programa para la física:

1-No admite ningún cuestionamiento de la noción de espacio-tiempo, ya que su concepción de “realidad física” descansa en la necesidad de la separabilidad espacial entre los sistemas.

2-En virtud del punto 1, tampoco admite el ocaso de la descripción espacio-temporal, aunque no la identifica con la localización puntual de la teoría corpuscular, puesto que defiende la naturaleza continua de una teoría de campo.

3-En relación con los dos puntos anteriores, tampoco compartirá con Bohr su interpretación fenoménica de estas propiedades físicas de la materia: para Einstein el espacio-tiempo tiene realidad si se entiende como un marco de naturaleza continua y no independiente de la acción que la masa ejerce sobre él. Por este motivo, le otorga una significación objetiva al espacio a partir de su unión con el tiempo, en su teoría de la relatividad.

Con tal programa recuperaría la descripción espacio-temporal como modelo objetivo y realista del tipo de representacionismo de la descripción física de la realidad: el espacio, aunque no sea absoluto, es real (como un continuo espacio-temporal), ya que sirve de principio diferenciador o separador de los sistemas físicos y, por tanto, no es una propiedad que surja con la interacción observacional, sino que “pre-existe” como una propiedad “real” de los objetos al margen de si son, o no, observados y sometidos a medición.

No obstante, según la complementariedad, los procesos independientes (individuales) no son descriptibles, ya que no son fenómenos. Aquí se sitúa el punto de inflexión que caracteriza la oposición de los criterios, que defienden ambos físicos: el *realismo del espacio-tiempo* de Einstein frente al *fenomenismo de las propiedades espacio-temporales*, de Bohr. En otras palabras, para Bohr el espacio no es un elemento objetivo, no es un elemento de la realidad física; sólo es el resultado de la unión entre el objeto cuántico y el dispositivo experimental, con lo que obtenemos el valor de la medición de alguna propiedad fenoménica. Concebir la inseparabilidad espacial como una cuestión epistemológica no supuso para Bohr ningún escollo, aunque se negara la objetividad del espacio ya que la complementariedad requiere que las propiedades mecánicas, incluidas las relacionadas con el espacio, sean fenoménicas y, así, no pertenecen a la realidad independiente de la observación; sólo le pertenecen al fenómeno. Por este motivo, me refiero a su postura como “fenomenismo espacio-temporal”.

Einstein acusará, por esto, a Bohr de haber prescindido de la característica más emblemática de la física: describir la realidad, ya que, para él, ésta tiene como elemento objetivo el espacio-tiempo (“realismo espacio-temporal” de Einstein); por lo cual, la mecánica cuántica no puede tratarse de una teoría realista, que tenga como campo de investigación, estudio y conocimiento el objeto físico. Dado que su criterio de realidad consiste en que todo aquello que tiene una *existencia real* debe estar *localizado en el espacio* de tal forma que ninguna medición efectuada a cierta distancia pueda alterar en lo más mínimo su estado real físico, esta separabilidad espacial, o física, implica que las diferentes regiones del espacio sean siempre independientes; en función de este principio, los objetos físicos pueden tener una “existencia autónoma”, ya que podemos situarlos en un continuo espacio-temporal, donde los diferentes objetos ocupan diferentes regiones del espacio. Así pues, la separabilidad espacial de cualquier sistema físico, era, precisamente, el requisito para la realidad de los objetos físicos. Además de ser, también, el motivo por el cual las nociones clásicas son *intuitivas*, ya que éstas expresan claramente la “existencia autónoma” de aquéllos, los objetos físicos, en el marco espacio-temporal.

Por este motivo, el *debate Einstein-Bohr* no puede caracterizarse como una discusión a favor o en contra del determinismo porque, a pesar de que éste era uno de los rasgos que Einstein defendía dentro de lo que debía ser una teoría completa, no obstante, el criterio de realidad tiene como primera premisa, no el determinismo, sino lo siguiente: todo aquello

que tiene una existencia “real” debe estar “localizado en el espacio” de tal forma que ninguna medición efectuada a cierta distancia pueda alterar su estado real físico. Pero, esto último no ha de engañarnos a la hora de pretender definirla como una polémica realista-fenomenista porque Bohr no defendió el fenomenismo absoluto o radical, que le atribuyó Einstein. Esto está justificado por las siguientes razones: porque Bohr propone una revisión del concepto de realidad y no su supresión; porque rechaza el positivismo en favor de un realismo matizado, en función de la doctrina del actor espectador: las propiedades son fenoménicas, pero los objetos a los que éstos aluden son reales; porque Bohr no acepta el vocablo “fenómeno” como “sensación de los sentidos”; su “fenómeno” hace referencia también a las “cosas percibidas” (objetos): así, dice “no” al positivismo, al instrumentalismo, al fenomenismo tradicional o absoluto y al idealismo; porque, si en el concepto de realidad se da una inseparabilidad sujeto-objeto y defiende su doctrina del actor-espectador, se ve que no ha suprimido ni la parte del “objeto” ni la del “sujeto”; por tanto, la tesis de Bohr proviene del reconocimiento del concepto de *objeto*, cuyo *uso está limitado pero no abolido*: sólo se rechaza el “dogma ingenuamente realista”. De ahí que en la complementariedad, aunque la “nueva objetividad” se defina desde el lenguaje y no a partir de la realidad independiente, haya una apelación ontológica a la realidad como soporte del lenguaje físico, para que éste conserve algo de su capacidad descriptiva, de su significado extralingüístico, de su contenido intuitivo, desde el cual se pueda mantener una conexión necesaria entre los elementos de la teoría y los elementos objetivos pertenecientes a la realidad física.

Sin embargo, este tipo de realismo, implícito en la doctrina de Bohr, no pudo ser aceptado por Einstein ya que el compromiso ontológico que tomó Bohr tiene como punto de partida el fenomenismo: Bohr pasó del fenomenismo al realismo para no quedarse en el nivel positivista, que defiende pero sólo en parte, porque mantiene un compromiso ontológico entre teoría y realidad que va más allá de los preceptos del positivismo, cuyo inconveniente es que no propuso nada que avalara dicha postura realista.

En cambio, Einstein mantiene un tipo de realismo que sí justifica, y no sólo postula, el cual parte de la noción de espacio objetivo y continuo (“ostensivo”), que no es euclídeo, pero donde se respeta el principio de separabilidad. Pues, este principio es la base, por un lado, de la condición de realidad y, por otro, del sentido físico de una teoría. Para legitimar esto, es decir, su creencia en una realidad objetiva, desarrolló el análisis conceptual, que expuse en el punto *a* del apartado 5.3, y que le llevó a una

noción de realidad, la cual se caracteriza por poder definirse en términos de “estados reales” de los fenómenos físicos en un marco espacio-temporal (objetivo). Ésta es la implicación del principio de separabilidad que utiliza Einstein para criticar la teoría cuántica.

Pero, en el banquillo de la oposición se sienta Bohr defendiendo que la mecánica cuántica es completa porque los estados físicos de los fenómenos ya no son independientes del contexto experimental y, por tanto, los “*estados reales*”, según los define Einstein, *no existen en la naturaleza*; sólo son una *idealización clásica*. De esta forma, el físico danés afirma que es completa porque no podemos ir más allá de la unión entre el objeto observado y su dispositivo experimental, que es consecuencia del cuanto de acción. Éste es el límite absoluto que la naturaleza impone a la descripción física y que la teoría cuántica nos ha revelado como el principio epistemológico del que se ha de partir en toda reflexión acerca de la completud, la objetividad y el significado o contenido físico extralingüístico de una teoría.

Todo esto conlleva que, para poder aceptar y entender el compromiso ontológico de Bohr y su postulado realista sobre el tipo de descripción física y completa de la mecánica cuántica, se ha de separar la noción de “realismo” y de “espacio”; pero se ha de actuar así porque, precisamente, tanto Einstein como, en general, el marco clásico las vinculan y esto se ve con claridad en el principio de separabilidad espacial de los sistemas físicos, que defendió aquél y que presidió en las teorías clásicas.

Para Bohr, sólo la búsqueda de un marco conceptual adecuado puede aportar a la teoría cuántica el contenido físico-intuitivo del que carece su formalismo matemático. Así pues, la solución de la dualidad onda-corpúsculo, a través de la idea de conservar un uso analógico de las nociones clásicas, le proporcionará a Bohr un medio para salvar algo de la descripción espacio-temporal, desde la que se podrá buscar un cierto acuerdo con el marco clásico para dotar de contenido intuitivo a la mecánica cuántica.

Einstein entendió a Bohr mejor de lo que él mismo reconoce a veces, de modo que no discute con él la cuestión del realismo planteándola ni en el ámbito de la objetividad ni en el del determinismo, sino desde el problema del contenido intuitivo, que es dónde la complementariedad tiene su punto débil, dado que Bohr sólo puede defender el carácter intuitivo de la física cuántica postulando otro tipo de conexión física entre los conceptos y los elementos objetivos (la realidad), esto es, ha de proponer un nuevo modelo de inteligibilidad sobre la base de un supuesto: postula

que los conceptos descriptivos de la física pueden tener un significado y un uso diferente al de la física clásica pero donde se conserva su valor “intuitivo”.

Dado que Bohr no explica cómo es esto posible ni tampoco se adentra en demostración o razonamiento alguno, el capítulo sexto se centra en que Einstein no se vio en la necesidad de decir nada más sobre esto salvo que él no “creía” en tal propuesta; así pues, como toda teoría física realista ha de tener contenido intuitivo y la física cuántica no lo tiene, pues no acepta el tipo de contenido intuitivo que Bohr defiende, concluye que esta teoría no es una “descripción completa” de la realidad, ya que no llega a establecer la conexión con el mundo físico que se le exige a toda teoría que pretenda ser algo más que un mero instrumento de predicción y cálculo y tener un valor explicativo además del valor predictivo. Hasta el próximo capítulo no se expondrán estas ideas y sólo apuntaré que Einstein plantea la completud de la física cuántica en el terreno del contenido intuitivo, por tanto, enfocó la polémica con Bohr desde una postura realista, que no hizo extensiva al pensamiento de Bohr; en cambio, éste polemizó con Einstein desde la perspectiva del indeterminismo físico, ya que entendió que aquél basaba su criterio de realidad y, por tanto, su condición de completud, en el terreno del determinismo.

La crítica de Einstein puede esquematizarse así. La mecánica cuántica no es una teoría completa porque: 1) no ofrece una descripción objetiva de la realidad, físicamente independiente del sujeto; 2) la teoría no representa directamente la realidad autónoma, dado su carácter estadístico; 3) esta descripción indirecta implica que no existe la conexión entre la realidad y la teoría que, supuestamente, describe; 4) por tanto, la mecánica cuántica es incompleta porque carece de contenido físico.

Los tres primeros puntos los he argumentado a lo largo de este capítulo; a continuación desarrollaré la demostración del último, en el capítulo sexto: la separabilidad espacial es el requisito para la “realidad” de los objetos físicos y es el fundamento y la justificación de su criterio ontológico, pues es la que determina los “estados reales” de los objetos; pero también justificará y dará validez a la tesis acerca de que los conceptos físicos son “intuitivos”, ya que expresan la existencia autónoma de aquéllos en el marco espacio-temporal.

En cambio, Bohr no le dio más importancia a la violación de este principio, por parte de la mecánica cuántica, que la de ser un supuesto epistemológico del marco clásico; hecho que escandalizó a Einstein porque él sí le daba un significado físico, “real”, ya que sobre tal principio se asienta su postulado acerca de la velocidad finita y constante de la luz. De

tal forma que si no separamos estas nociones (“realismo” y “espacio”), no habrá forma de sacar a la complementariedad de un planteamiento no-realista; pero, si las pensamos por separado, se puede afirmar que, si bien para Bohr el espacio y el tiempo son nociones que sólo le pertenecen al fenómeno, esto *abre un camino* para buscar el tipo de realismo, de inteligibilidad, de descripción física, de completud y, en definitiva, de ontología, que Bohr *propuso* sin especificar cuál sería; sólo negó que pudiera ser un “realismo espacial”, como el de Einstein.

En el capítulo séptimo, y último, defenderé que tal búsqueda puede realizarse a través del análisis filosófico que nos facilita la gnoseología y la fundamentación de la matemática, aunque es cierto que Bohr jamás habló de algo así y que empleó los términos de “intuición espacial” e “intuición temporal” sin connotaciones ontológicas y con un sentido simétrico, pero pienso que se puede ir más allá de la complementariedad, por este camino, sin derrocarla.

Pero antes de aquello, en el siguiente capítulo demostraré que la razón por la que Einstein le dio tanta relevancia a este problema de la violación de la separabilidad es porque este principio es la base sobre la que se levanta no sólo su *condición de realidad*, sino también, el criterio con el que determinar si una teoría tiene *contenido físico*, es decir, elementos objetivos necesarios para describir físicamente la realidad; sin los cuales una teoría es incompleta. Por ello, el problema del realismo está relacionado con el tipo de contenido intuitivo o físico, que poseen las teorías realistas y que es utilizado por ellas para describir la dicha realidad objetiva.

Tales factores objetivos incluyen, necesariamente, para Einstein, dado el principio de separabilidad, las propiedades espacio-temporales de los sistemas físicos, como propiedades objetivas, independientes de la observación, desde las cuales se puede describir la realidad de manera autónoma.

Por ello, afirmo que dicho principio además sostiene el fundamento de la noción de sentido físico, o contenido intuitivo, por ser la base de la condición de realidad de una teoría, porque los “estados reales” de los fenómenos físicos tienen su correlato teórico en los “elementos de realidad” contenidos en dicha teoría. Dichos elementos han de respetar el principio de separabilidad porque bajo él subyace la concepción einsteiniana de “espacio”, a partir de la cual construye la noción de “intuición” o “sentido físico” (*anschaulich*) que nos ha de proporcionar la comprensibilidad del mundo objetivo. Una afirmación como ésta necesita ser argumentada y así lo haré a continuación, a lo largo del siguiente capítulo.

CAPÍTULO VI:

«ANÁLISIS CRÍTICO DE LA POLÉMICA EINSTEIN-BOHR»

En el capítulo anterior expuse los planteamientos de ambos físicos, en relación con la polémica que protagonizaron: la tesis de Einstein y la de Bohr. Ahora, realizaré el análisis crítico de los fundamentos que las sostienen y de las ideas elementales que componen sus posturas.

Cuando en dicha polémica, se preguntan si la descripción mecánico-cuántica de la realidad es completa, en realidad, qué están preguntando. Ambos tienen concepciones distintas acerca de la completud de una teoría, lo cual se debe a que parten de principios epistemológicos opuestos para determinar el criterio y los requisitos, que se han de cumplir, para establecer si una descripción física de la realidad es o no completa. Por lo tanto, es necesario un detenido análisis de dicha polémica porque su sentido se esconde y se confunde entre estas concepciones tan distintas.

La tesis que me propongo demostrar en este capítulo es la siguiente: la Polémica Einstein-Bohr *tiene sentido*, no es enteramente un “diálogo para sordos”, pero éste permanece oculto bajo un manto de confusión lingüística, terminológica y epistemológica, que cubre la pregunta acerca de la completud.

Una vez que se ha levantado el velo, puede verse que el significado oculto de sus posturas encontradas gira en torno a la cuestión de la *conexión extralingüística que una teoría física ha de mantener con la realidad*. Es decir, aquello sobre lo que se están preguntando es si la mecánica cuántica tiene, o no, *contenido intuitivo*, ya que éste garantiza tal conexión y, por lo tanto, se convertirá en el criterio con el que decidir el *realismo* de esta nueva *descripción física* de la realidad atómica.

Antes de entrar en las posturas que mantuvieron Einstein y Bohr, en relación con el contenido intuitivo de las teorías, he de aclarar el significado de los términos que he venido usando porque, a partir de ahora, se convertirán en el centro de la exposición.

6.1) La Terminología del Debate sobre la Teoría Cuántica

No es fácil, quizás ni tan siquiera sea posible, dar una definición rigurosa, al tiempo que concisa, de todos los términos relacionados con el representacionismo del lenguaje y con el contenido intuitivo de las teorías físicas, ya que en todos ellos subyacen tesis filosóficas, que son las que determinan su significado y su definición.

Por esta razón, cotejaré el contenido semántico de tales nociones con las posturas filosóficas relacionadas con ellas, tanto las que están fuera del ámbito epistemológico de la física, pero que guardan aspectos relevantes con éste, como aquéllas que fueron defendidas por los propios físicos protagonistas de esta polémica.

a) Referencialismo, representación y significado extralingüístico

A lo largo de este trabajo, he mencionado diferentes tipos de “representación”, junto con su propia forma de conectar los términos teóricos con su referente el mundo físico. Tras el llamado “giro lingüístico”, que protagonizó la filosofía analítica del lenguaje, esto nos trae a la memoria el Positivismo Lógico y las “primeras teorías referencialistas” del significado, en concreto, la tesis de G. Frege, que identifica el significado de un concepto con su referencia, es decir con su extensión en el mundo material de los objetos. Las distintas teorías sobre filosofía del lenguaje, a las que ya me remití en el capítulo cuarto, pueden servir de base para entender el significado de estas ideas en el terreno de la física.

Es cierto que el objetivo de estas teorías fue la búsqueda de un lenguaje perfecto, libre de ambigüedades, en el ámbito de la lógica (y no de la física); además, dicho lenguaje, lógicamente construido, sustituiría al lenguaje natural, el cual, sin embargo, es imprescindible para la física, tanto en la tesis que defiende Bohr como en la de Einstein. Por ello, no pretendo entrar aquí en la exposición y evolución que tuvo esta corriente sobre el estudio del lenguaje; sólo voy a llamar la atención sobre algunas cuestiones básicas, relacionadas con este trabajo, con el fin de aportar una mayor claridad expositiva en relación con la noción de “contenido intuitivo” de los términos físicos. Su relevancia está en que, en estas teorías lógicas sobre el lenguaje, una de las cuestiones principales que trataron fue el estudio de la conexión que los términos lingüísticos mantienen con la realidad.

Comenzaré por Frege, que encabezó la “vertiente tradicional” de la teoría referencialista del significado y estableció una distinción entre la referencia y el sentido de un enunciado, lo designado y el modo de designarlo¹, con el objetivo de justificar y explicar el isomorfismo entre el lenguaje y el mundo. De tal forma que una oración, que contenga dos términos con una igualdad, puede tener, lo que él llamó, “valor cognoscitivo” (y Einstein “contenido de verdad”) porque, teniendo la misma “referencia”, estamos designando de dos maneras diferentes, con distintos “sentidos”, al mismo objeto.

Para Frege la referencia o significado (*Bedeutung*) de un nombre es el objeto, en cambio, el sentido (*Sinn*), o la intensión, es la *forma* como se da esa referencia en el lenguaje, la cual establece las condiciones lógicas o formales bajo las cuales podemos utilizar cierto término para referirnos a un determinado “objeto” (que en este trabajo he venido entendiendo como “realidad física”, o “significado extralingüístico” de los conceptos físicos).

El razonamiento de Frege fue que las expresiones que forman una proposición, cuando ésta afirma algo, han de estar conectadas con la realidad, de tal manera que la referencia del predicado es una función que tiene como argumento el objeto designado por el nombre y que puede

¹ El precedente histórico de esta distinción que hace Frege se encuentra en el estudio que Stuart Mill realiza sobre el lenguaje en la obra que escribió en el año 1843, *A System of Logic Racionative and Inductive*, donde no sólo recoge la distinción tradicional de la filosofía medieval entre los nombres categoremáticos (cuyo significado alude a seres, objetos, acciones o cualidades) y los sincategoremáticos (como aquéllos que sólo tienen una función lingüística de determinación, modificación o relación), además distingue entre los nombres connotativos, que se refieren a un sujeto e implican un atributo (sustantivos y atributivos de segundo orden) y los no connotativos o exclusivamente denotativos con los que *etiquetamos* las cosas, meramente las nombramos sin especificar sus propiedades (nombres concretos y singulares como son los nombres de atributos de primer orden y los nombres propios). Según la terminología de Frege, la connotación sería el sentido de un término y lo denotado la referencia. Sin embargo, hay una gran diferencia entre ellos, pues, para Mill, el significado de un término no es la referencia y, por tanto, no se produce al nombrar algo, sino que viene dado por su connotación, de forma que si únicamente tienen denotación, como los nombres propios, éstos carecen de significado. (Cf. HIERRO S. PESCADOR, J., *Principios de Filosofía del Lenguaje*, pp. 173-177). Por el contrario, Frege afirmará que tales nombres en el lenguaje ordinario no sólo tienen referencia, también tienen sentido y Russell concluirá que, precisamente, por esto, por tener sentido, estos nombres pueden ser sustituidos por descripciones definidas, razón por la cual no son nombres propios en sentido lógico. (En definitiva esta doctrina de Mill se opone, así, a la corriente referencialista,) de la cual fue un precursor y a la que podemos definir de una manera general en los siguientes términos: “Una teoría referencialista del significado es una teoría que tiende a construir el significado de las expresiones primordialmente bajo la forma de una relación como la que hay entre un nombre y lo nombrado”. *Ibid.*, p.175.

adquirir como valor cognoscitivo los dos valores veritativos, verdadero o falso².

Siguiendo el principio de composicionalidad de Frege³, la referencia de toda proposición compleja es una cuestión lógica y de estructura, pues depende del valor veritativo de las oraciones que la componen; pero, a su vez, la verdad o falsedad de aquéllas depende de la referencia de sus partes constitutivas, que, en última instancia, ha de ser la extensión de un término o nombre, *cuya determinación efectiva es una cuestión extralingüística y extralógica*, ya que requiere ir a la realidad y comprobar si en ella hay algo a lo que alude cada una de las expresiones que contiene.

Tanto la referencia como la intensión de un término, que Frege introduce como un aspecto del “sentido”, nos permiten determinar el valor veritativo de una proposición, el cual es la referencia de ésta, mientras que su sentido es el pensamiento que “captamos” al entender tal enunciado, el cual lleva asociado unas determinadas condiciones de verdad que pueden ser o no lógicamente equivalentes a otras. Si son lógicamente equivalentes, entonces expresan el mismo pensamiento y si no lo son, expresan dos pensamientos diferentes que pueden tener o no la misma referencia⁴, ya que

² Frege descompone toda oración en dos tipos de expresiones, saturadas (nombres) y no saturadas (predicados): las primeras son completas porque incorporan la manera de darse la referencia y, por este motivo, tienen sentido por sí mismas; las segundas llevan al menos un lugar vacío y dependen de que ese lugar lo ocupe un nombre para tener sentido completo. Al oponer, de esta forma, objeto y función, Frege no sólo entiende por “objeto” realidades físicas, sino también números, puntos, figuras y verdad/falsedad, en el sentido de que objeto es todo aquello a lo que se refiere una expresión completa o saturada; por esto puede afirmar que la referencia de una oración es su valor de verdad o falsedad. Su razonamiento es el siguiente: por un lado, las oraciones son expresiones completas, de manera que han de referirse a un objeto, y, por otro lado, observó que el valor cognoscitivo de una oración no cambia al sustituir sus términos constitutivos por otros que posean la misma referencia; esta conexión le confirmó el poder considerar el valor veritativo como la referencia de una oración.

³ También llamado “principio de extensionalidad”.

⁴ Por medio de esta distinción Frege pudo explicar cómo es que dos términos se pueden relacionar con una igualdad, pues si son la misma cosa la igualdad sobraría y, sin embargo, hay cierto tipo de igualdades que nos dicen algo, es decir, que poseen “valor cognoscitivo”. La explicación es que la relación no se da entre los objetos, sino entre las distintas maneras de designar esos objetos. Así, todas las expresiones del lenguaje, desde los nombres hasta las oraciones, tienen referencia y sentido, lo designado (denotación) y el modo de designarlo (connotación), y en una igualdad del tipo $x=y$, ambos términos tienen la misma referencia, pero distinto sentido, lo cual hace que sea una verdad empírica, que contiene diferentes pensamientos expresados por diferentes proposiciones, pero que designan lo mismo. Este

esta proposición, aun siendo falsa, puede tener sentido siempre y cuando sus términos posean extensión, es decir una referencia extralingüística en el mundo de los objetos. Por otro lado, hay un tipo de oraciones, cuyo valor cognoscitivo no depende de la referencia de los términos que la componen, sino de la situación, por ejemplo, la verdad o falsedad del enunciado “Necesariamente A” depende de la situación en que sea verdadera o falsa; así, hay algo distinto de la referencia que nos permite establecer su valor cognoscitivo en cada situación posible y esto es la intensión, que Frege utiliza para determinar cuándo una deducción es correcta⁵.

Al igual que Frege, el objetivo de Bertrand Russell fue establecer qué relaciones guardan las palabras con el mundo, las cuales nos permiten entender las oraciones del lenguaje y hacer afirmaciones sobre él. Russell no usó explícitamente la distinción de Frege entre *sentido* y *referencia* y empleó de forma indiscriminada el término “significado” para referirse tanto a uno como a otro; sin embargo, introdujo otra distinción lingüística muy acertada entre “nombres propios”, designadores rígidos, y “nombres comunes” o “descripciones definidas”.

Cuando Russell partió en pos de un lenguaje lógicamente perfecto, lo primero que se propuso fue limpiar al lenguaje de las imperfecciones lógicas de los lenguajes naturales u ordinarios y acabar con la ambigüedad que contienen éstos. Para ello, formuló una condición semántica: debe haber una palabra y sólo una para designar cada objeto simple, de modo que dicha palabra tenga siempre el mismo significado, en cualquier contexto y para cualquier hablante (con lo cual, se eliminan las ambigüedades). Estos términos podemos combinarlos entre sí y formar un enunciado simple que se refiere a un hecho atómico y que, a su vez, podemos volver a combinar para construir proposiciones complejas⁶.

tipo de verdad se diferencia de la tautología o verdad analítica en que en ésta no habría diferencia alguna en la referencia ni en la forma en que se da ($x=x$).

⁵ Cf. FREGE, “Sobre sentido y referencia”, en: Estudios sobre semántica, Ariel, Barcelona, 1971.

⁶ Tal y como ocurría en la propuesta de Frege, las proposiciones compuestas podían descomponerse en otras más simples y establecer su valor veritativo en función de la verdad o falsedad de las proposiciones atómicas que la componen.

De toda esta doctrina suya, que él denominó “atomismo lógico”⁷, aquello que me interesa destacar, en el contexto de este estudio, es el trasfondo referencialista sobre el que construye su teoría del significado. Para Russell el conocimiento de cosas puede producirse de dos formas, por familiaridad (conocimiento directo) o por descripción⁸: por un lado, el primero, dice Russell, “*implica siempre algún conocimiento de verdades que constituya su fuente y su fundamento. (...)Diremos que tenemos conocimiento directo de algo cuando sabemos directamente de ello, sin el intermediario de ningún proceso de inferencia ni de ningún conocimiento de verdades*”; por otro lado, el significado de un término es el objeto y cuando éste es un objeto físico o material su conocimiento no es directo sino que se produce “por descripción” o, también llamado, “**conocimiento por referencia**”. Este tipo de conocimiento lo distingue del conocimiento directo, a través del cual se nos presentan, por ejemplo, los datos de los sentidos⁹.

Pero, estos datos son la base de todo posible conocimiento posterior; el conocimiento por descripción es la forma más elaborada de conocimiento pero “todo nuestro conocimiento, lo mismo el conocimiento de cosas que el de verdades, se funda en el conocimiento directo”¹⁰. Y este conocimiento es el que tenemos de los *particulares*: éstos son siempre un nombre propio en sentido lógico, pues los particulares sólo se pueden

⁷ De esta forma tan concisa, Hierro S. Pescador define el objetivo de la teoría de Russell: “se trata de llegar a los últimos elementos que el análisis lógico del lenguaje pueda encontrar en éste, y puesto que el lenguaje, en lo que es filosóficamente relevante, y de acuerdo con el principio de isomorfia, corresponde estructuralmente a los hechos, por lo mismo llegaremos a los últimos elementos de la realidad. En este sentido, el análisis de Russell va de la lógica a la metafísica a través de la filosofía del lenguaje”. HIERRO S. PESCADOR, J., Principios de la filosofía del lenguaje, p. 192.

⁸ RUSSEL, B. Los problemas de la filosofía, cap. 5, p. 47. A continuación elabora una lista de las cosas que conocemos por conocimiento directo, en la que incluye los datos de los sentidos, los recuerdos, nuestros estados psicológicos e incluso los conceptos universales.

⁹ Aunque Russell admite que estos datos sensibles pueden conducirnos a error, ellos también son “signos” de la existencia de la materia: “En este capítulo hemos convenido, aunque sin poder hallar una razón demostrativa, que es racional creer que nuestros datos de los sentidos -por ejemplo, los que consideramos como asociados a mi mesa- son realmente signos de la existencia de algo independiente de nosotros y de nuestras percepciones. Es decir, que por encima y más allá de las sensaciones de color, dureza, ruido, etc., que constituye para mí la apariencia de la «mesa», admito que existe algo más, de lo cual estas cosas son la apariencia”. *Ibid*, p. 31.

¹⁰ *Ibid*, p. 48.

nombrar; para describir sus propiedades, acciones y relaciones acudimos a los adjetivos, verbos y adverbios dentro del predicado de la proposición, en la que aquéllos son el sujeto.

Para Russell, los nombres propios en sentido ordinario, los que se usan en los lenguajes naturales, son, en realidad, *descripciones definidas abreviadas* que no sólo se limitan a nombrar pues encubren una lista personal de descripciones de aquello que están nombrando. Por esto, los nombres lógicamente propios son los auténticos, que representan en la proposición a los particulares y cuya forma es la de un término deíctico, como los pronombres demostrativos. Éstos son los términos más simples del lenguaje, los cuales tienen referencia directa en el mundo y que conocemos de manera directa¹¹.

Esta teoría, que acabó denominándose “tradicional”, fue la base para las futuras teorías pero también fue rebatida en algunos de sus aspectos por los filósofos de la “nueva teoría de la referencia”, como Quine, Kripke, Donnellan, Lewis o Putnam, quienes abrieron la veda de la discusión acerca cuál es realmente el sentido, la intensión, la referencia y la extensión de un nombre propio: Donnellan habló del uso atributivo y uso referencial de éstos, entendidos como “descripciones definidas asociadas”; Kripke, de “designadores rígidos” en el sentido que usó Quine de “etiquetas”; Lewis discutió la tesis de Kripke introduciendo el concepto de “mundo posible” y distinguiendo los criterios de identificación, para el principio de identidad, según lo entendamos *de re* o *de dicto*, y Putnam zanjó la cuestión sobre los nombres propios (“términos indéxicos”), eliminando toda alusión a éstos: todos los nombres son comunes, unos determinan clases nominales (“términos atributivos”) y otros clases naturales (“términos referenciales”).

Otro caso, algo aparte, puede ser el del primer Wittgenstein, que en su “Tractatus” identifica la referencia y el significado de un concepto con su extensión y ésta es el objeto, sea lo que sea aquello que Wittgenstein entiende por objeto. A diferencia de Frege, aquél atribuye sentido, exclusivamente, a las proposiciones y sólo los nombres simples, aquéllos que meramente nombran el objeto sin describirlo, tienen referencia: las proposiciones únicamente tienen sentido y los nombres sólo tienen

¹¹ No obstante, esta doctrina tiene un fuerte inconveniente: “No parece, pues, imposible tener un lenguaje cuyos nombres sean términos deícticos semejantes a los demostrativos. La consecuencia es que su uso quedará restringido a las experiencias actuales y mientras éstas duren. Es un lenguaje limitado a la expresión de datos sensibles actuales, y por ello, de vocabulario en gran medida privado y, como tal lenguaje, no apto para la comunicación”. HIERRO S. PESCADOR, J., Principios de la filosofía del lenguaje, p. 211.

referencia. El *Tractatus* es una versión del atomismo lógico de Russell y una de las ideas centrales que Wittgenstein había tomado de aquél es que, dado el postulado del isomorfismo estructural entre lenguaje y lógica, la lógica no sólo determina la estructura del lenguaje, también lo hace de la estructura de la realidad¹².

En el *Tractatus*, Wittgenstein postula la existencia de los objetos y del mundo para poder explicar el sentido de las proposiciones del lenguaje: para que éstas tengan sentido es necesario que el lenguaje y el mundo se “toquen” en algún punto, han de ser formalmente homogéneos; ésta es la tesis logicista del isomorfismo estructural entre el mundo y el lenguaje, pero a nivel netamente lógico o formal, no se trata de una homogeneidad física o material entre la estructura del lenguaje y la de los objetos físicamente reales.

Ahora bien, estos “objetos” de Wittgenstein no son los de la experiencia ordinaria, ya que no han de tener propiedades materiales; son objetos “simples”, un puro sustrato de posibilidades lógicas. De tal forma, que los objetos simples son la sustancia del mundo, su sustrato lógico porque un objeto es la “forma lógica” de sus propiedades formales y se caracteriza por ser algo que sólo está sometido a las posibilidades de la lógica. Por tanto, la referencia “fregeana” que utiliza el primer Wittgenstein en su teoría del lenguaje no se distingue de la intensión, tal como la definió Frege, pues el referente del lenguaje no es el objeto físico en sí mismo, sino un “objeto lógico”, lo cual hace que la *representación figurativa* sea un tipo de *representación lógico-formal*, antes que *representación material*: las palabras tienen como referencia las condiciones formales de los objetos (materiales o complejos) y sus posibilidades lógicas; esta tesis suya acerca de la representación figurativa como una representación lógico-formal es el elemento más original de su trabajo.

Wittgenstein considera que el lenguaje representa figurativamente los hechos a través de una relación de isomorfía, la cual sólo se puede aplicar a los nombres y a las proposiciones elementales, pero no a las complejas¹³. Las representaciones isomórficas (figurativas o pictóricas) son

¹² Esta tesis será rechazada por él mismo más tarde, en su segunda etapa, cuando rechazó el atomismo lógico.

¹³ “Las proposiciones complejas contendrán, además de nombres, elementos a los que nada corresponde en la realidad, como, por ejemplo, los cuantificadores, diferentes partículas conectivas, etc. Un análisis de estas proposiciones complejas nos conducirá, obvia e inevitablemente, a proposiciones simples (4.221; éste es el supuesto básico del atomismo lógico). Y una proposición simple es, para Wittgenstein, una estructura o concatenación de nombres (4.22). Los símbolos simples son nombres, y las proposiciones elementales son

aquellas que cumplen dos condiciones: «primero, a cada elemento de lo representado corresponde un elemento en la representación; y segundo, a las relaciones que hay entre los elementos del hecho corresponden relaciones entre los elementos de la representación»¹⁴. Para Wittgenstein si algo es una representación de la realidad ha de cumplir dos condiciones: la primera es que exista una correspondencia o correlación entre los elementos de la representación, de la figura, y los elementos de la realidad que estamos representando a través de esa “figura”; es lo que Wittgenstein llama “relación de representación”. Pero en los parágrafos (2.15) y (2.151) del *Tractatus* afirma que, además de aquello, ha de tener “forma de representación”, la cual se define allí mismo como «la posibilidad de que las cosas se hallen relacionadas entre sí como los elementos de la representación».

Aquí introduce el término de “posibilidad” para dar cabida tanto a las representaciones verdaderas como a las falsas, que no por esto dejan de ser una representación¹⁵; de ahí que la *forma de representación* sea esta posibilidad lógica de ser verdadera o falsa, que, en último término, es aquello que tiene en común la representación isomórfica y la realidad representada por ella¹⁶; pero esta “forma de la representación” es siempre una *forma lógica*. No obstante, para él no existen las representaciones verdaderas *a priori*, porque, aunque la forma lógica es lo que hace posible la representación, no puede ser, a su vez, representada; sólo mostrada:

“La forma de representación, tanto en su aspecto meramente lógico (forma lógica), como en cualquier otra determinación que tenga (forma espacial, coloreada, etc.), no es propiamente representada por la figura,

funciones de nombres (4.24)”. HIERRO S. PESCADOR, J., Principios de la filosofía del lenguaje, p. 229.

¹⁴ *Ibid*, p. 216.

¹⁵ Si la representación es falsa, entonces lo representado no existe en nuestro mundo, pero podemos hablar de “mundos posibles” donde a la posibilidad de representación le corresponda una situación posible. En otras palabras, por ser una representación, aunque falsa, implica la posibilidad de que lo representado exista; en términos de Berkeley, la representación falsa tiene una *realidad formal* aunque no posee una *realidad material*.

¹⁶ El sentido de una proposición es su estructura y, aunque no tenga referencia, si es una proposición elemental, representa un “estado de cosas”, o una situación, posible, el cual define la estructura en la que se relacionan determinados objetos. En caso de ser una proposición compleja no es isomórficamente representable porque aquello que le corresponde es un hecho, del cual sólo podemos afirmar, de una manera no muy exacta, que es un conjunto de múltiples estados de cosas.

sino exhibida o mostrada por ella (2.172). La representación representa una situación posible y muestra lo que tiene en común con dicha situación, a saber, la forma de representación”¹⁷.

Éste es el motivo por el cual concluye Wittgenstein que el lenguaje no *representa* la realidad, sino que, más bien, la *muestra* o la *exhibe*. Con esta fórmula pretende dar respuesta, sin entrar en el ámbito de la ontología¹⁸, a aquello que no se expresa en el nombre, es decir a la pregunta: cómo se conecta un nombre con la realidad, cuál es su conexión. Esta conexión se muestra en el lenguaje a través de su uso: cuando usamos el lenguaje, éste nos muestra a qué se refieren los nombres que incluyen las proposiciones que hemos empleado; sin embargo, también afirma que aquéllas no pueden entenderse si no conocemos de antemano la referencia de sus nombres simples. Tal circularidad es explicada por Hierro Pescador como sigue:

“La conclusión de este aparente círculo vicioso únicamente puede ser que el uso de un lenguaje presupone la conexión entre sus signos simples y los objetos del mundo, y que esta conexión no puede ser propiamente explicada, sino simplemente mostrada, enseñando cómo se usa el lenguaje”¹⁹.

Por todo esto, y teniendo siempre presente el principio de isomorfía como una correlación de estructuras lógicas, se ha de entender que el *lenguaje representa figurativamente* la realidad *de un modo metafórico* sin aludir a nada visual²⁰ y esta relación es la que nos permite disponer de “reglas de traducción” para pasar de una partitura a unos sonidos o de un hecho a un lenguaje sintáctico; Wittgenstein las llama “leyes de

¹⁷ HIERRO S. PESCADOR, J., Principios de la filosofía del lenguaje, p. 221.

¹⁸ Como sí había hecho Russell al hablar de conocimiento por familiaridad para explicar cómo es que los nombres tienen su referencia en el mundo.

¹⁹ HIERRO S. PESCADOR, J., Principios de la filosofía del lenguaje, p. 225.

²⁰ Es cierto que en ocasiones, Wittgenstein usa el término figurativo “Bild” con tales connotaciones, asociándolo a la escritura jeroglífica. No obstante, tal y como aclara Hierro Pescador: “Casos como éste, en los que la relación de isomorfía es visualmente perceptible y se convierte, por ello, en semejanza externa, son casos extremos que pueden ayudarnos a captar cómo concibe Wittgenstein la representación figurativa, pero no expresa lo fundamental de su concepción. Son ejemplos especialmente llamativos, pero nada más”. HIERRO S. PESCADOR, J., Principios de la filosofía del lenguaje, p. 226.

proyección”, donde se proyecta una de ellas en términos de la otra (4.0141).

Es decir, si bien admite que entre los rasgos de la *forma de representación* está la *espacialidad* como una propiedad o determinación de lo representado, antes que ésta, y que cualquier otra, está la *forma lógica* que es la base de toda representación, pero, como la *forma* es aquello que comparte la representación con lo representado, la forma lógica es también la forma de la realidad.

Por esta razón, para toda la corriente logicista, el isomorfismo estructural entre la realidad y la representación es un isomorfismo lógico: ambas comparten la misma estructura lógica y este punto en común es nuestro “puente”, aquello que posibilita la conexión entre una y otra, entre la exterioridad del mundo y la interioridad de nuestras representaciones²¹; es aquello que nos permite suponer que éstas son representaciones factibles de la realidad, que pueden ser verdaderas o falsas pero que, en cualquier caso, tienen *sentido (Sinn)*, aunque hemos de especificar que, en el caso de Wittgenstein, estamos hablando de *sentido lógico*, que es el único que podemos conocer *a priori*, independientemente de la experiencia.

Por el contrario, el *sentido físico*, sobre el que se está debatiendo en este estudio, es aquél que, teniendo lógicamente sentido, además comparte con la realidad una relación de veracidad; es decir, una *representación con sentido físico* es aquella que no sólo tiene sentido lógico, no sólo representa una posibilidad, sino también una situación o hecho real, para lo cual hemos de comparar la representación con la realidad, esto es, se ha de acudir a la experiencia, a través de las observaciones y mediciones de los experimentos.

No obstante, a pesar de las muchas diferencias entre la filosofía del lenguaje y la filosofía de la naturaleza (física), hay puntos que tratan en común y cuya comparación es interesante realizar. En primer lugar, al margen de cómo se realice la referencia, todas estas teorías implican que la realidad se nos manifiesta a través del lenguaje; *toda referencia es extralingüística* (aunque no siempre extralógica, como se ha visto), lo cual

²¹ “Con ello queda formulado explícitamente el principio de isomorfía tal y como Wittgenstein lo entiende: la realidad es representable en la medida en que tiene una estructura o forma lógica, justamente el tipo de estructura o forma que posee toda representación por el hecho de serlo. En la forma lógica coinciden nuestras representaciones de la realidad y la realidad en cuanto representada (2.2). Russell nunca había llegado a una fórmula tan explícita ni tan general (nótese que todavía no hemos hablado de lenguaje)”. *Ibid*, p. 220.

nos aleja de cualquier postura pragmatista acerca del significado de los términos semánticos.

Pero tal postura implica, en todas estas teorías, que, de una manera u otra y en última instancia, los elementos básicos del lenguaje natural, por estar formados a partir de los datos de nuestros sentidos, son imprescindibles para representar la realidad. Lo cual está de acuerdo con la tesis que explicitó Bohr acerca de la imprescindibilidad de este lenguaje y que también está implícita en las ideas de Einstein. Aunque, ciertamente, en el caso, por ejemplo de Russell, aquellos elementos básicos del lenguaje que se refieren directamente a la realidad no son los “nombres propios” en sentido ordinario, sino en sentido lógico, es decir, los términos deícticos (“esto”, “aquello”...), tal tesis está equivocada porque tiene el inconveniente de llevarnos a un lenguaje demasiado limitado y privado, que le privaría de la característica básica de comunicar.

Por lo tanto, la doctrina de Russell, de este “atomismo lógico”, no está capacitada ni sirve para plantear objeciones a la tesis del lenguaje (cualitativo) de la física: si el lenguaje posee elementos básicos, formados a partir de las experiencias sensoriales y que se refieren directamente a la realidad, han de ser más amplios que los términos particulares, los simples pronombres demostrativos, para poder servir como medio de comunicación; estos son los conceptos físicos, elaborados a partir de aquellas experiencias y depurados por el proceso de matematización y teorización de las teorías físicas. En consecuencia, la formación del “conocimiento por referencia o por descripción” dependerá de la posibilidad de tener diversos tipos de referencia, de los que Russell no habla porque, para él, éste se construye a partir de los particulares lógicos; no obstante, dicha tesis siembra el terreno para la discusión acerca del tipo de referencia: “figurativa” o “abstracta”. Por esta razón, para Wittgenstein, el referente del lenguaje es un “objeto lógico” y no físico o material, lo cual hace que la *representación figurativa* sea un tipo de *representación lógico-formal*, antes que *representación material*, la cual si permitiría una visualización del objeto físico en el espacio y tiempo.

En realidad, puede pensarse que esta tesis, quizás, esté más próxima al pensamiento de Bohr que al de Einstein, pero, únicamente, en tanto que el planteamiento logicista es más abstracto y nos aleja del isomorfismo físico de las propiedades espacio-temporales entre teoría y realidad, que fue defendido por Einstein y con el que consigue una representación realista espacio-temporal de la realidad extralingüística.

No obstante, no se puede identificar con las ideas de ninguno de los dos científicos, en la medida en que el isomorfismo logicista de

Wittgenstein se aleja del ideal físico descriptivo porque, si bien Wittgenstein considera que el lenguaje representa figurativamente los hechos a través de una relación de isomorfía, la cual sólo se puede aplicar a los nombres y a las proposiciones elementales, pero no a las complejas, este isomorfismo ha de ser lógico.

En cambio, el ideal físico persigue la representación teórica de un mundo extralingüístico y, por supuesto, extralógico, que posee propiedades físicas, materiales (de un tipo u otro) pero que no son de naturaleza lógica o formal.

En el caso de Einstein, el referente físico de la representación espacio-temporal, que él defiende, es el objeto material, independiente, con propiedades espacio-temporales reales que se nos manifiestan tal cual son y por ello podemos tener modelos ostensivos de la realidad.

Para Bohr, tal referencia se realiza de forma analógica, constituyendo una representación simbólica de los sistemas físicos en el marco del espacio-temporal, con propiedades fenoménicas inseparables del proceso de observación y medida. Lo cual nos lleva a distinguir entre tres tipos generales de representación: la visual (característica del marco clásico), la ostensiva en el espacio (que defiende Einstein) y la simbólica (propuesta por Bohr).

b) “Modelos ostensivos” y “simbolismo” frente a la “visualización clásica”

Una vez concluida la parte expositiva de algunas de las teorías que se han dedicado, exclusivamente, a estudiar el lenguaje y su referencia, vuelvo al tipo de lenguaje (con referencia extralingüística y extralógica), de representacionismo y de descripción, que las ciencias físicas manejan. Ahora bien, esta representabilidad descriptiva del mundo que nos rodea puede ser, de manera general, de tres tipos: la representación de los objetos físicos que se emplea en el marco clásico; su representación en un marco realista espacio-temporal, que propone Einstein; y aquella otra que proponen Heisenberg y Bohr: la representación no se realiza de los objetos sino de los fenómenos físicos y es simbólica.

En primer lugar, la representación que se emplea en el marco conceptual de la física clásica, expuesta en capítulos anteriores, se la suele denominar “representación pictórica”, “especular” o “visual”. Este tipo de representación lleva implícitos los postulados que expuse en el capítulo I y que la constituyen de tal manera que la referencia del concepto es

*inmediata*²², es el propio objeto, descrito mecánicamente, según el ideal cartesiano, a través de *figuras* y *movimiento*, en el marco geométrico euclídeo, ya que las propiedades espacio-temporales, que definen a los conceptos mecánicos, se suponen objetivas: pertenecientes al objeto de manera independiente a toda medición.

Otro tipo de representabilidad es la que proponen Heisenberg y Bohr. Para ellos una interpretación intuitiva del formalismo cuántico, que nos ofrezca una representación del mundo, se realiza no a través de la imagen visual, pictórica, ostensiva o especular que proporciona la geometría de Euclides, sino por medio de un símbolo, el cual se usa por analogía al representacionismo pictórico del marco conceptual de la física clásica. Es decir, se niega el ideal cartesiano de describir el objeto material con figuras y movimiento (espacio plano, tiempo homogéneo y materia impenetrable), de tal manera que los conceptos descriptivos clásicos, en el ámbito de la física cuántica, sólo *representan espacio-temporalmente* la realidad *de forma simbólica* (no *real*), pues las propiedades de aquel tipo no son objetivas sino fenoménicas. Por esta razón, algunos autores, como Chevalley, presentan así a la física cuántica:

“En otras palabras, el carácter intuitivo de la teoría es de índole abstracta y lógica: la física de los fenómenos atómicos impone sustituir las imágenes, físicas sensibles por un «concreto» de tipo matemático. La ruptura con el significado habitual de intuición física es tanto más total cuanto que la afirmación es serena y casi indiferente al abuso de autoridad que conlleva. Por otra parte, la teoría es completa, según Born y Heisenberg, puesto que permite predecir sin ambigüedad los resultados de todos los experimentos imaginables en ese campo. De modo análogo, no se considera completa una teoría por el hecho de que refleje exactamente todos los aspectos de lo real, sino por el hecho de que, en cuanto a los objetos comprendidos en su campo, puede ofrecer respuesta a todas las cuestiones que puedan formularse (...). A esta teoría física brutalmente presentada como intuitiva y completa aun cuando renuncia a la visión tradicional de la mecánica y aun cuando postula una indeterminación fundamental del conocimiento de los procesos atómicos, la exposición de Bohr le va a dar la dimensión de una interpretación filosófica general”²³.

²² De manera consciente, al usar esta expresión, he dejado de lado la cuestión, que maneja la psicología cognitiva, de que todo lenguaje ya implica de por sí una mediatez.

²³ CHEVALLEY, C., “Una nueva ciencia”, pp. 42-43. En: DELIGEORGES, S., El mundo cuántico.

Pero este planteamiento de la postura de Bohr está, en gran parte, equivocado. Es cierto que la tesis del simbolismo de Bohr rompe “con el significado habitual de intuición física” y que no refleja “exactamente todos los aspectos de lo real”, pero tampoco implica una renuncia completa a la posibilidad que tiene el lenguaje de referirse a la realidad ni lo convierte en una cuestión lógica ni matemática; sólo cambia el tipo de referencia pictórica por otra simbólica. El significado de los términos sigue teniendo un origen extralingüístico en el mundo y no viene determinado por ninguna convención humana o por el *uso* que la comunidad de hablantes realiza de ellos. En este sentido, la tesis semántica de Bohr acerca del lenguaje no guarda ninguna relación con las propuestas logicistas ni con las *teorías pragmatistas del significado*, o utilitaristas, como, por ejemplo, la que defendió el segundo Wittgenstein.

Iniciaré este interludio, acerca del ámbito semántico de los términos relacionados con la *descripción física*, analizando la *representación visual de la física clásica*, que, gracias a la tesis del referencialismo tradicional de los conceptos descriptivos del lenguaje teórico, nos presenta la descripción física de los fenómenos como la imagen pictórica (real) de procesos espacio-temporales.

La “visualización” es el término clave en torno al cual gira toda la polémica suscitada por la revolución cuántica. Por ello, ahora, fijaré el significado del término “visualización” de un fenómeno físico. Lo primero que este término nos presenta es que alude a la posibilidad de imaginarnos cualquier objeto, inscrito en el espacio y en el tiempo, y en cualquier estado: en movimiento o inmóvil, es decir, estable. Lo que destacaré de esto es que los objetos físicos se caracterizan, habitualmente, por ser entes que residen en el espacio y en el tiempo ordinarios; su habitáculo (entorno) espacio-temporal es la característica de su visualización o figuración; es lo que nos permite visualizar los objetos a través de un modelo físico, pues es la forma cómo aquéllos se nos manifiestan, a través de una figura geométrica. Sin embargo, no siempre se precisan ambas formas de intuición: si está en reposo, sólo se necesita pensar en la localización espacial; pero, si está en movimiento, se le ha de añadir un valor temporal.

En segundo lugar, la mecánica es el estudio del movimiento y, como se sabe, la mecánica clásica visualizó el movimiento con la ayuda de las nociones espacio-temporales y de los principios dinámicos de conservación. Ahora bien, cuando manejamos las diversas consideraciones temporales, que la física puede asignar a los cuerpos, podemos representarnos tanto un objeto clásico en movimiento (por ejemplo, un

proyector)²⁴ como la *figura* de una onda²⁵. En el segundo caso, el movimiento, y con él la dimensión temporal, es intrínseco a la naturaleza del objeto; en el primero, es extrínseco a su estado interno: el tiempo sólo configura un cambio en su localización espacial, un cambio de coordenadas, por eso podemos hacernos una representación parcial de él, en la cual únicamente usamos su dimensión espacial. En cambio, en el caso de la onda tal abstracción temporal es irrealizable; es posible imaginar una “onda cerrada”, que goza de un “relativo reposo”²⁶, pero es inconcebible la idea de una onda sin frecuencia y, por tanto, sin movimiento, cuya representación precisa, para su realización, tanto del espacio como del tiempo.

Tras estas consideraciones sobre el movimiento, se admitirá que, para obtener tanto una imagen pictórica o visual como una representación espacio-temporal real, o, dicho de otro modo, para que el objeto físico se nos presente de una manera “ostensiva”, se han de incluir las categorías espacio-temporales, quizás no como “formas a priori”, pero sí, al menos, como dos maneras “objetivas” de ordenar el material sensible, sean del tipo que sean²⁷.

En pocas palabras, el representacionismo pictórico, que propició el atomismo mecanicista de Newton, supone que existe entre la realidad y los conceptos lingüísticos de la teoría una relación de isomorfía, no sólo estructural o lógica, sino más bien física (o, quizás, geométrica): son los factores espacio-temporales los que conectan teoría y realidad. Por ello, la coincidencia entre la estructura espacio-temporal de nuestro entendimiento y de la realidad viene a sustituir, en el contexto de la física, a la estructura lógica entre el pensamiento (lenguaje) y el mundo como garantía del isomorfismo estructural, que los filósofos del lenguaje sostuvieron a la hora de justificar la validez y la objetividad de un conocimiento, obtenido a través del lenguaje, pero con un contenido extralingüístico. Aún más, este

²⁴ Un objeto cuya localización y trayectoria se ajusta al eje de coordenadas cartesianas, inscrito en un marco espacial de naturaleza continua y, geoméricamente, plano (euclídeo).

²⁵ Cuya naturaleza ondulatoria es la de un objeto espacial y temporal al cincuenta por ciento.

²⁶ Digo “relativo” porque su movimiento es cíclico.

²⁷ Toda representación, o descripción física, se obtiene a partir de cierto tipo de ordenación, de tal forma, que la intuición también puede entenderse como “forma de ordenación” del material sensible o incluso, como “condición de posibilidad” (Kant). Por ejemplo, según Leibniz, el espacio implica un orden (lógico) de coexistencia; el tiempo, en cambio, un orden (lógico) de sucesión.

marco espacio-temporal es de tal tipo que coincide con el marco ordinario donde se dan nuestras percepciones cotidianas. Aquí se está hablando del espacio plano de la geometría euclídea y del tiempo independiente, reversible y homogéneo de la mecánica newtoniana. Únicamente, en este contexto, bajo estas condiciones, es cuando podemos hablar de una representabilidad de tipo pictórica²⁸.

Einstein se aleja de tal tipo de representación en tanto que no persigue un retorno al esquema newtoniano, pues, además, su teoría de la relatividad implica que el tiempo es inseparable del espacio, el cual, a su vez, no coincide con el espacio plano de la geometría de Euclides sino con el espacio esférico de la geometría de Riemann. No obstante, él defenderá que su teoría de la relatividad sí tiene contenido intuitivo y es capaz de representar la realidad, frente a la carencia de aquél que padece la física cuántica, incapaz, por tanto, de ofrecernos una representación veraz, una descripción física, del mundo objetivo. En los siguientes párrafos profundizaré en el tipo de intuición que Einstein plantea para defender esto; de momento, lo único que diré es que aquello que ésta tiene en común con la representabilidad pictórica es que el contenido físico o intuitivo de una teoría es aquél que *contiene* elementos objetivos, los cuales son compartidos por la teoría, el lenguaje del físico, y la realidad, ya que aquéllos son el puente que conecta la una con la otra y que tales elementos objetivos, esto es lo importante, los encontramos en la descripción espacio-temporal.

Tal prototipo de descripción implica la construcción de modelos geométricos, a partir de los cuales la realidad se nos “manifiesta” tal y como es; es decir, aquéllos son una manifestación objetiva de las características reales de aquélla. En este sentido, uso el término “ostensivo”, que si bien es más amplio que el de “visualización” o “representación pictórica” y, por lo tanto, puede aplicarse también al representacionismo del espacio y del tiempo clásicos, prefiero emplearlo sólo cuando hable del tipo concreto de representación espacio-temporal, defendido por Einstein, con el fin de disponer y poder usar una terminología unívoca. De tal forma que una representación es ostensiva cuando, directamente, nos muestra o manifiesta algo: la imagen “manifiesta” es un término que emplea Sellars cuando se refiere a la representación depurada de la imagen “originaria”, a través de un

²⁸ Fuera de la geometría plana y del mecanicismo de Newton no podemos hablar de representación pictórica, pues qué tipo de modelo pictórico podemos formarnos, por ejemplo, de una enzima o de un espacio “curvo”.

afinamiento empírico y categorial, puede servir de ejemplo de este tipo de representación. En cuanto que la representación simbólica puede entenderse como una imagen, que él llama, “científica”. Ésta se caracteriza por ser una idealización, aún mayor que la anterior, a través de formas abstractas o simbólicas²⁹.

Este fue el tipo de representabilidad que Einstein defendió como el modelo de descripción física que debía mantenerse, ya que pensaba, como afirmé más atrás, que el marco espacio-temporal era real y que, por tanto, formaba parte del conjunto de “elementos objetivos” que una teoría contiene cuando es una descripción completa y real del mundo físico. Sin embargo, dado que no defiende un retorno al esquema clásico ni al espacio plano de la geometría euclídea, se hace necesario un posterior análisis acerca de su concepción de espacio-tiempo para aclarar qué es lo que Einstein entiende por “visualizable” e “intuitivo”³⁰.

En los primeros capítulos, cuando confronté el marco de la física clásica con la física cuántica, se podía hablar, de forma general, de descripción mecánica de los objetos físicos como la representación pictórica de éstos frente a la representación simbólica. En cambio, ahora,

²⁹ Cf. SELLARS, W., “La filosofía y la imagen científica del hombre” (1971), en: Ciencia, percepción y realidad, pp. 9-49. En concreto, dice el autor en la página 28, que la imagen científica se trata de “una construcción teórica basada en cierto número de imágenes, cada una de las cuales está *apoyada por* el mundo manifiesto”. De ahí que ambas imágenes hayan de estar relacionadas pero no tienen por qué identificarse plenamente, incluso pueden entrar en conflicto. Cuando esto ocurre hay que tener en cuenta que “por muy relacionado que esté el pensamiento conceptual con las sensaciones y las imágenes, no se lo puede igualar a ellas, ni a complejos de ellas” (Ibid, p. 41). Pero también nos advierte del peligro que se corre al relacionarlas, ya que es fácil caer en el error de “tomar en serio la pretensión que pueda arbolarse *cualquier* parte de la imagen científica de ser *lo que realmente hay*, y a retirarnos a la postura de que la realidad que hay realmente es el mundo de la imagen manifiesta, en tanto que todas las entidades postuladas por aquella otra imagen serían “instrumentos simbólicos”, que nos servirían para manejárnoslas en el mundo, siendo tal su única función (algo así como sucede con los medios de medir distancias que se colocan junto a los mapas), pero sin que en sí mismos describiesen verdaderos objetos ni procesos. De acuerdo con esta tesis, *todas* las contrapartidas teóricas de los rasgos de la imagen manifiesta serían *igualmente* irreales, y la concepción filosófica certera del hombre-en-el-mundo sería aquella que respaldase a la imagen manifiesta y situase en su interior la imagen científica a modo de instrumento conceptual empleado por el hombre manifiesto en su facultad de científico” (Ibid, pp. 40-41). Esta actitud nos dejaría sin una referencia objetiva del lenguaje simbólico como tal.

³⁰ En el próximo epígrafe quedará totalmente definida la posición de Einstein acerca no sólo de cómo ha de ser la representabilidad del mundo por parte de las teorías físicas, sino también sobre aquello que justifica su postura: la intuición espacial.

se ha de incluir nuevas matizaciones, pues el realismo de Einstein no encaja plenamente con el que definimos allí como “realismo clásico”: los límites entre uno y otro se han movido y hemos de enfrentar el tipo de representación simbólica de Bohr con el otro tipo de representación que mantiene Einstein, la cual puede denominarse “representación ostensiva” a través de modelos espacio-temporales, geométricos, pero no euclídeos pues no coinciden con los modelos pictóricos del espacio ordinario, euclídeo y directamente perceptible; sin embargo, existen “leyes de proyección”, según la terminología de Wittgenstein, o como las llama Einstein, en el mismo sentido, “leyes de conversión” o de “correspondencia”, que nos permiten pasar de un tipo de geometría a otro, con lo cual tenemos una representación espacio-temporalmente objetiva, que no es pictórica, pero que es susceptible de tender una correspondencia “indirecta” con el mundo de nuestras representaciones ordinarias a través de la conversión geométrica³¹.

Reconduciré, ahora, estas consideraciones hacia la postura de Bohr, partiendo del análisis que realicé en el cuarto capítulo, y hacia el otro tipo de representabilidad, que él defiende. Aquel aspecto que propiciaba la visualización de los sistemas, el de la descripción espacio-temporal como elemento objetivo de la descripción física, es decir, con contenido intuitivo, es el que la física cuántica no puede seguir manteniendo del todo; el simbolismo de Bohr, en la representación del mundo por parte de las teorías, es su propuesta para recuperar parte de este tipo de descripción. No obstante, este camino recorrido por Bohr se aparta de todo contexto ontológico, lo cual significa que no concederá a la representación espacio-temporal el rango de realidad objetiva: el espacio-tiempo no tiene categoría ontológica, en contra de la postura de Einstein, las propiedades espacio-temporales no existen en el mundo objetivo al margen de una observación.

Es bien conocido que el primer intento de resolver esta situación fue el de Heisenberg: el formalismo matemático no necesita interpretación y la teoría sólo necesita incluir magnitudes estrictamente mensurables, lo que él llamó “observables”: energía cinética, energía radiante, frecuencia...; la localización espacio-temporal y la velocidad quedaron fuera. Pero, se recordará que Bohr convenció a Heisenberg de que esta renuncia no solucionaba el problema: la física cuántica necesitaba recuperar, de alguna forma, la descripción espacio-temporal (y con ésta, el contenido intuitivo)

³¹ Sólo la geometría euclídea disfruta de la correspondencia directa, o mejor dicho, coincidencia o isomorfía física entre los modelos espaciales que ofrece y los modelos perceptivos que podemos formarnos en el espacio ordinario.

porque sin ella se volvería inexplicable la cuestión general del movimiento y del diferente comportamiento de los fenómenos a nuestra escala, ya que se han de poder describir ciertos procesos espacio-temporales, como, por ejemplo, la noción de trayectoria que un electrón realiza en una cámara de niebla³²; además, sin los conceptos clásicos tendríamos dos mundos inconmensurables y, perderíamos la capacidad de verificación, porque la física cuántica, como cualquier otra teoría física, se verifica por los experimentos, cuyos aparatos de medida son macroscópicos, es decir, se construyen, diseñan, se verifican y divulgan en términos clásicos.

Por todo esto, se acabó aceptando incluir algunos conceptos clásicos como “observables”; pero estos *recientes observables* en física cuántica son incompatibles; de ahí, el objetivo del principio de Heisenberg y de la complementariedad: nos dan las normas para poder utilizarlos a pesar de su incompatibilidad.

De tal forma que los conceptos descriptivos de la física ya no harán referencia a nada visualizable o pictórico; así como, tampoco, lo hace el término “observable” que Heisenberg manejó en su mecánica de matrices. La diferencia entre ellos está en que los primeros son, en realidad, los conceptos dinámicos y cinemáticos pero con sus respectivas limitaciones impuestas por el principio de indeterminación; en cambio, los “observables” se refieren a aquellas magnitudes que podemos medir, libres de tales restricciones, y con las que operamos las matrices de la física cuántica, pero que carecen de aquella capacidad descriptiva de los anteriores al no ofrecer una representación espacio-temporal, de naturaleza ostensiva o “real”, del mundo físico.

En realidad, Heisenberg también acabó admitiendo como “observables” a los primeros (“observables incompatibles”) siempre y cuando se tenga en cuenta que la imprecisión en la medida de estas variables es condición indispensable para la aplicación del formalismo a la experiencia, pues es el único puente entre ambos; pero, de tal forma que dotar del máximo contenido intuitivo no equivale a visualizar (no podemos reconstruir la descripción espacio-temporal como modelo pictórico) porque

³² “El asunto detonante de las reflexiones que han conducido a Heisenberg a la formulación de un principio de indeterminación ha sido la imposibilidad de dar cuenta desde la mecánica cuántica de la noción de trayectoria de los electrones, tanto si se trata de un hecho inobservable -órbitas electrónicas alrededor del núcleo del átomo-, como si se trata de un hecho observable -recorrido espacial en la cámara de niebla. Pero éste no es sino un episodio concreto dentro de una problemática más general consistente en la incapacidad de la mecánica constituida en 1925 para describir procesos que tengan lugar en el espacio y en el tiempo”. RIOJA, A., *Los orígenes del principio de indeterminación*, p. 134.

la precisión máxima con la que podemos conectar el formalismo con la naturaleza es inferior al límite clásico. Ya me referí a que, para Heisenberg, las magnitudes pueden tener significado físico si les podemos atribuir un valor numérico, a través de alguna operación de medida; sólo que, en el caso de las magnitudes canónicamente conjugadas, este valor no puede ser exacto, ya que no son “observables compatibles” porque no están definidos con independencia de los actos de medida, con lo cual no pueden tener valores definidos simultáneamente. Así, el máximo de certidumbre con el que podemos medirlas y, por tanto, asignarles un valor numérico que les otorgue sentido físico, viene dado por las relaciones de indeterminación.

En física cuántica, aquella representación de los fenómenos físicos, sobre la base de una descripción espacio-temporal, se realiza no de una manera pictórica ni ostensiva, sino simbólica, desde la que se considera a la descripción espacio-temporal como una idealización y no como una manifestación directa de la realidad, o dicho de otro modo, ostensiva³³. Por consiguiente, las implicaciones espacio-temporales del significado físico de un concepto sólo pueden ser simbólicas; es decir, su *representación figurativa* en el sentido de imagen pictórica, por medio de una *figura geométrica espacio-temporal clásica*, no tiene referente lingüístico en la realidad.

Pero, hay otro tipo de representación, otra forma de representación del mundo, una nueva “imagen” de éste: aquélla que Russell llamó “conocimiento por referencia”, una referencia no directa del objeto y en el caso de Bohr mediatizada por un símbolo, cuyo referente extralingüístico sólo puede ser *descrito en nuestro lenguaje de forma analógica* porque se ha vuelto imposible el “conocimiento directo” y, por lo tanto, también toda

³³ Aquí, Bohr tuvo que hacer importantes concesiones al fenomenismo, al afirmar que las imágenes espacio-temporales de los fenómenos ondulatorios y los corpusculares, sobre la base de su incompatibilidad y exclusión mutua empírica (o experimental) son complementarios a pesar de su incompatibilidad y mutua exclusión lógica, puesto que no se contradicen si los consideramos fenómenos distintos por surgir en condiciones experimentales diferentes. También hubo interpretaciones realistas de la dualidad onda-corpúsculo, donde la descripción espacio-temporal no se consideraba una idealización, sino real; se trata de interpretaciones como la de de Broglie (onda-piloto) o como las “nubes electrónicas” de Schrödinger, que ya he analizado. Pero, cualquier interpretación realista-materialista, es decir, no-fenomenista al estilo de Bohr, implica que la realidad puede mandar señales más rápidas que c , e incluso, que los electrones remontan el curso del tiempo o que mantengan conexión telepática, sin vinculación causal alguna, con otras partículas, o que estas partículas se desdoblén y después se vuelvan a conformar en una unidad. ¿Realmente, estas interpretaciones “realistas” son capaces de devolver a la ciencia la inteligibilidad del mundo?

construcción posterior del conocimiento, basado en aquél. No tiene referente extralingüístico y el único conocimiento posible es “por analogía”; ciertamente, se trataría de un conocimiento indirecto de la realidad, pero que, al fin y al cabo, sería una forma de conocer aquélla y de representárnosla.

Esta tesis cumple, en cierto modo³⁴, las dos condiciones que exige Wittgenstein para que algo sea una representación de la realidad: por un lado, hay una “relación de representación”, donde existe una correlación entre los elementos de la representación y la realidad representada, y, por otro lado, además, respeta la condición de mantener “forma de representación”, como *posibilidad* de representación verdadera o falsa. Por ello, la representación simbólica da cabida a la “posibilidad” de que los objetos atómicos puedan representarse como “ondas” o como “corpúsculos” sin ser verdaderas o falsas ninguna de estas dos “formas de representación” del objeto, pues aquélla sólo implica, parafraseando a Wittgenstein, «la posibilidad de que las cosas se hallen relacionadas entre sí como [lo hacen] los elementos de la representación».

No obstante, esta propuesta de Bohr acerca del simbolismo es una tesis filosófica y como tal ha de mantenerse mediante razones y argumentos, que la justifiquen. Al final, volveré sobre ella para comprobar si estaba, suficientemente, avalada. De momento, sólo la he aludido para insistir, una vez más, en que la polémica Einstein-Bohr está planteada, en el fondo, en estos términos y el problema, que tanto Heisenberg como Bohr pretendieron resolver fue éste: el del contenido intuitivo de la física cuántica a través de su relación con los términos descriptivos de la física clásica, los cuales están cargados de significado físico.

c) La aportación de Einstein: la doble faceta, gnoseológica y ontológica, del “contenido intuitivo”

Si bien fue Heisenberg quien propuso el empleo de esta noción en el debate de la teoría cuántica, Einstein fue un poco más allá que él a la hora de precisar su sentido y de afianzarlo como concepto, ya que pudo ver que éste introducía la noción de intuición como elemento ontológico además de gnoseológico. Es decir, cuando una teoría posee contenido

³⁴ Wittgenstein habla de *posibilidad lógica*, la cual no puede ser defendida en este contexto físico porque el requisito fundamental de la *descripción física* es que sea una representación *material* y no *formal* de la realidad.

intuitivo es porque los elementos gnoseológicos del lenguaje conceptual de aquélla tienen su correlato en la realidad extralingüística con ciertos elementos objetivos relacionados con el espacio y/o con el tiempo, en tanto que intuiciones. De este modo, se decidió por una de estas dos para que llenara dicho “contenido” intuitivo, ya que sin, al menos, una de las dos formas de intuición quedaría *vacío* de elementos que coincidieran en la realidad y en la teoría: elementos objetivos u ontológicos y elementos subjetivos o gnoseológicos. Tanto Heisenberg como Bohr, aunque éste en menor medida o con matices, se quedan en el segundo aspecto, mientras que Einstein avanza hasta el aspecto ontológico que ha de mantener el concepto de contenido intuitivo, el cual se asienta sobre los elementos objetivos que contienen las teorías físicas.

Pienso que Bohr, a diferencia de Heisenberg, también vio esto, pero no pudo salvar ni la intuición temporal ni la espacial como elementos objetivos, sino fenoménicos, que son usados de manera simbólica y por analogía a su significado en el marco clásico. Por ello, su criterio para decidir si la mecánica cuántica tiene o no contenido intuitivo no recurre a ninguna de estas dos intuiciones, en tanto elementos objetivos con realidad física en la naturaleza, ni a principio físico alguno; su criterio será gnoseológico o epistemológico, en el sentido de proponer un cambio en el modelo de inteligibilidad. Es decir, un cambio en la forma como “entendemos” la realidad, nos la representamos, la describimos y la comunicamos a los demás, a través de aquellos elementos, espacio-temporales, que son tratados únicamente como elementos fenoménicos y gnoseológicos porque, repito, este cambio es una modificación en la forma de entender la realidad, la cual no se de realizar a través del significado clásico y objetivo de la intuición espacial y temporal. Esto implica un cambio en la manera de relacionarse entre sí estas intuiciones para ofrecer una representación del mundo. Pero lo dicho aquí es sólo un avance y en un próximo epígrafe volveré sobre esta propuesta de Bohr.

En el caso de Einstein, su tesis acerca de la inviolabilidad del principio de separabilidad espacial es la razón que le llevó a defender la *espacialidad*³⁵ como *criterio físico* para identificar el contenido intuitivo, sin la cual la teoría está *vacía de tal contenido*. Dicha espacialidad es un

³⁵ Cuando hablo de “espacialidad” en Einstein se ha de recordar siempre que es un concepto *sui generis*, ya que el tiempo está incluido en él como una coordenada más. En cambio, yo defenderé en el capítulo séptimo que se ha de dar la vuelta a esta idea de Einstein: el espacio está incluido en la intuición temporal, esta última es la que tiene prioridad, y con ello se conseguiría llenar ese recipiente del contenido intuitivo en el caso de la teoría cuántica.

elemento objetivo de la realidad y por ello llena de “contenido de verdad” a la teoría, la cual es capaz de representarla bajo un concepto preciso y bien definido, que opera como elemento gnoseológico. La unión de ambos permite la conexión entre teoría y experiencia, entre gnoseología y ontología, entre el lenguaje físico (conceptos) y realidad extralingüística (objetos), con lo cual deja establecido, así, el criterio para juzgar el realismo y la verdad de una teoría y además, siguiendo tal criterio, si tiene o no contenido intuitivo.

Insistiré en lo siguiente, a modo de esquema: el contenido intuitivo es aquello que conecta teoría y realidad; en términos de la filosofía del lenguaje es la conexión entre el término lingüístico y su referencia extralingüística en el mundo, el objeto. Para la filosofía del “Tractatus” de Wittgenstein es la estructura lógica lo que pone en relación a ambos; para el representacionismo pictórico, del marco clásico, es la estructura espacial geoméricamente plana e independiente del tiempo; para Einstein, es también la estructura espacio-temporal, pero entendida de otra forma, tal que no se corresponde directamente con la estructura de nuestras percepciones espacio-temporales ordinarias y de características euclídeas, de ahí que Einstein buscará un tipo de correspondencia indirecta con este último tipo de estructura espacio-temporal para defender el realismo y el contenido intuitivo de su teoría de la relatividad; pero no el de la física cuántica. La razón de esto es que él piensa que dicha física está en contradicción con la concepción de un marco espacio-temporal, sea del tipo que sea, como elemento objetivo de la descripción, esto es, con categoría ontológica. Así pues, el tipo de representación, que defiende Einstein, se basa, fundamentalmente, en un acercamiento de la física con la geometría: la teoría describe físicamente la realidad si incluye en su representación los factores objetivos del espacio-tiempo, es decir, si es capaz de ofrecer un modelo geométrico de aquélla.

Cuando Bohr propone que las únicas condiciones de la objetividad sean las condiciones intersubjetivas de un lenguaje inequívoco, con *contenido físico*, convierte a la objetividad en una propiedad de las descripciones y no de la realidad, a la que sólo accedemos por el uso inambiguo de los conceptos clásicos, con lo cual se pierde la conexión directa entre teoría y realidad, que estaba implícita en el concepto de “realidad física independiente”, ya que éste se ha extirpado como base de la noción de “objetividad física”. Dado que, en la complementariedad, se ha perdido tal conexión y, sin embargo, una de las condiciones para la comunicación inambigua sigue siendo que los dispositivos experimentales sean descritos con los términos clásicos del lenguaje ordinario, se hace

necesario recuperarlos de algún modo y de ello se encargan las relaciones de incertidumbre y el principio de correspondencia. No obstante, al perder el camino de la conexión directa, ya que no se puede ignorar la inseparabilidad entre el objeto observado y el instrumento de medida, con el que interacciona para hacer posible su observación, Bohr deberá justificar la posibilidad de ofrecer una descripción física y una forma de representar el mundo que se realice a través de otro camino.

En estos términos fue como continuó su discusión con Bohr y será el enfoque que seguiré empleando a continuación, ya que ha quedado demostrado que plantear la polémica en función de una alternativa entre realismo y fenomenismo, o determinismo-indeterminismo, no nos aporta ninguna solución. En cambio, otro camino se abre si es enfocada en términos de dos tipos de referencialismo, por parte de los conceptos espacio-temporales: el *referencialismo de tipo objetivo espacio-temporal* y aquel otro tipo de *referencialismo fenoménico* de las propiedades espacio-temporales, en relación con el significado de los conceptos físicos; o también, como un *realismo espacial* frente a un *realismo simbólico*. De ahí que si la descripción mecánico-cuántica es completa o no, depende de si tiene contenido físico o no lo tiene; otra forma de plantearlo es preguntarse por sus “elementos objetivos”.

De cualquier forma, ¿cuál de los dos métodos, el realismo espacio-temporal o el fenomenismo simbólico, es el adecuado para garantizar que una teoría tenga conexión con la realidad? El *realismo objetivo espacio-temporal* de Einstein está justificado por el principio de separabilidad espacial; ¿cuál es el hecho que justifica el *referencialismo simbólico* de Bohr? Ninguno, Bohr sólo lo postula³⁶ y es en este punto donde Einstein exige una justificación, una razón que le dé fundamento a su filosofía, ya que el valor de toda ella depende de si ese uso analógico de los conceptos, que, según Bohr, confieren contenido intuitivo a la física cuántica y hacen que sea una descripción completa de la realidad, tiene algún aval. Como Bohr no le sugirió ninguno y sólo apeló a su validez, Einstein no “sintió” la necesidad, que experimentaron otros físicos, de aceptar ni la interpretación de Bohr ni la completud de la física cuántica. Es por este motivo por el que Pais describe en los siguientes términos la postura de Einstein:

³⁶ Einstein fue más allá que Bohr en este aspecto. Por lo tanto, se necesitaría ir más allá de la complementariedad para contestar a la pregunta de Einstein: “¿Es completa la física cuántica?”.

“Durante los últimos veinticinco años de vida, Einstein sostuvo que la mecánica cuántica es incompleta. Ya no creía que la mecánica cuántica estuviese equivocada, pero sí creía que el punto de vista común de la comunidad de los físicos era erróneo al suponer a los postulados de la mecánica cuántica una condición de definitivos, que encontraba ingenua e injustificada”³⁷.

Pues bien, estoy de acuerdo con Einstein al denunciar que es un error postular un realismo tan extraño sin ofrecer una justificación de él. Pero, el físico alemán, por su parte, también cometió otro grave error al emplear el término “intuición” de forma ambigua, con un significado diferente en diferentes contextos. De modo que puede hacerse la siguiente distinción, que me parece lícita, en favor de la claridad: en determinados textos, alguno ya citado³⁸, cuando Einstein habla de “intuición” se refiere a una especie de *inspiración* del científico a la hora de elegir el sistema conceptual sobre el que construirá su teoría³⁹. Pero, cuando habla del “carácter intuitivo” de los conceptos alude a aquel rasgo de *idealidad* con el que se construyen los conceptos, que no se deriva lógicamente de la experiencia, pero que ha de estar conectada con ella de alguna manera, para que aquellos posean *contenido, sentido o significado físico*. Ya mencioné que Einstein postula aquella conexión necesaria desde su “sentimiento cósmico religioso”, a través de una creencia en la racionalidad del universo y de una armonía preestablecida; sin embargo, no me detendré más en esto, porque lo que ahora me interesa son los elementos puramente epistemológicos, con los que construye aquello que debe ser la base conceptual de la ciencia.

Recuérdese que en el capítulo anterior realicé una aclaración sobre el término “intuitivo”: “anschaulich” e “intuitiv” son las dos formas lingüísticas para designar en alemán a dicho término. Entonces afirmé que

³⁷ PAIS, A., *El Señor es sutil... La ciencia y la vida de Albert Einstein*, p. 450.

³⁸ EINSTEIN, A., *Notas Autobiográficas*, p. 17. EINSTEIN, A., *Autobiographical Notes*. In: *Albert Einstein: Philosopher and Scientist*, pp. 12-13.

³⁹ “Resulta problemático el uso, por otro lado muy frecuente, que hace Einstein del término «intuición» para referirse al «salto» que conduce del mundo de las experiencias sensoriales al de los conceptos. No parece atribuirle un significado filosófico preciso sino que alude simplemente al proceso de «inspiración» no racional por el que surge en la mente del científico una posible solución ante un problema determinado, de modo semejante a como se le ocurren al paciente lector de las páginas de pasatiempos de los diarios las respuestas a un crucigrama”. RIOJA, A., “Einstein: el ideal de una ciencia sin sujeto”, *Revista de Filosofía*, nº 2, p. 91.

en aquellos textos, Einstein emplea “intuitiv”, dándole el sentido de ser una percepción clara y evidente de una verdad, sin la mediación de la razón o de la lógica, para referirse al tipo de conexión o relación («conexión intuitiva») entre los conceptos y las percepciones, la cual posibilita a la teoría física para tener *contenido intuitivo*.

Sin embargo, señalé que en este contexto está hablando de la *naturaleza* del vínculo o relación (“Beziehung”) entre concepto y percepción: conexión intuitiva (“intuitive Verknüpfung”; “intuitive connection”, en alemán y en inglés, respectivamente); éste es el aspecto que se refiere al *carácter del nexa* o de la *conexión* entre conceptos y percepciones sensibles, es decir a la naturaleza del *continente* y no del *contenido*: si este vínculo no es de naturaleza lógica sino *intuitiva*, entonces el pensamiento científico ha de tener un carácter constructivo y especulativo, puesto que Einstein emplea aquí el término “intuitivo” sólo en el sentido de *creación arbitraria* o “supuesto libre”. Sólo se refiere al continente y en ningún caso al “contenido intuitivo” en sí mismo (en alemán: “anschaulichen Inhalt”; en inglés: “intuitive content”); es decir, al empleo que yo realizo del concepto “intuitivo”. Para nombrar a éstos utilizaré “Sinn” e “Inhalt”, cuya traducción inglesa es “meaning” y “content”⁴⁰.

No obstante, la traducción inglesa no siempre distingue entre contenido físico e intuitivo, lo cual arrastra un error de interpretación cuando es, a su vez, utilizada para traducir al castellano estos términos, que habitualmente tienen distintos significados. Por ejemplo, el artículo de Heisenberg, donde expuso por primera vez sus relaciones de indeterminación para resolver el problema del *contenido intuitivo* de la mecánica cuántica, lleva por título en su publicación original en alemán “Über den *anschaulichen Inhalt* der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik”, *Zeitschrift für Physik*, 43, 172-98 (1927); sin embargo, en lugar

⁴⁰ Volveré a citar el texto, al que me estoy refiriendo, en su idioma original: “Die Begriffe und Sätze erhalten «Sinn» bzw. «Inhalt» nur durch ihre Beziehung zu Sinnen-Erlebnissen. Die Verbindung der letzteren mit den ersteren ist rein intuitiv, nicht selbst von logischer Natur. Der Grad der Sicherheit, mit der diese Beziehung bzw. intuitive Verknüpfung vorgenommen werden kann, und nichts anderes, unterscheidet die leere Phantasterei von der wissenschaftlichen «Wahrheit». La traducción inglesa es la siguiente: “The concepts and propositions get «meaning», viz., «content», only through their connection with sense-experiences. The connection of the latter with the former is purely intuitive, not itself of a logical nature. The degree of certainty with which this relation, viz., intuitive connection, can be undertaken, and nothing else, differentiates empty phantasy from scientific «truth». EINSTEIN, A., *Autobiographical Notes*. In: *Albert Einstein: Philosopher and Scientist*, pp. 12-13 (op. ya citada).

de traducir “anschaulichen Inhalt” como “contenido intuitivo”, se tradujo como “contenido físico”: “The *Physical Content* of Quantum Kinematics and Mechanics”⁴¹. Nótese que en el original, Heisenberg al igual que Einstein, en otros textos donde se refiere explícitamente al aspecto que yo he destacado en el empleo y en la definición de “intuición”, usa el vocablo “anschaulichen” y no “intuitiv”.

A lo largo de este trabajo, empleo “contenido intuitivo” de los conceptos físicos como sinónimo de “contenido físico” y de “significado intuitivo o físico”, de modo que no uso el término “intuición” para caracterizar la naturaleza de ese vínculo entre teoría y realidad, sino para designar al *elemento* que se halla *dentro* de dicho contenido, de manera que este *contenido* no esté vacío y su *continente* pueda otorgar a la teoría, que usa los conceptos con significado físico, un rango de certeza. Ya he dicho que Einstein sí lo empleó para hablar de la naturaleza “intuitiva” de dicha conexión: el carácter de la conexión, afirma, no es de naturaleza lógica, en contra del Positivismo Lógico, así como tampoco podemos saber cómo es que se produce. Sin embargo, aquí utiliza el mismo término, “intuitivo”, con otro significado, cuya acepción es obviamente distinta a aquella otra que emplea para hablar de los elementos (intuiciones), cuya función es llenar de contenido objetivo (con rango ontológico y extralingüístico) a los conceptos de las teorías físicas, los cuales se caracterizan por ser subjetivos y por inscribirse en el ámbito gnoseológico, dado que son objetos lingüísticos o *creaciones* arbitrarias del lenguaje humano.

Es más, el propio Einstein admite que tal “rango de certeza” es lo único que «diferencia la mera fantasía de la “verdad” científica»; por lo tanto, el *contenido* o el *significado*, al que yo añado la noción de “intuitivo”, es el criterio para decidir si una teoría emplea conceptos con referente extralingüístico, lo cual le otorga el carácter de teoría realista (y completa) porque es capaz de describir físicamente la realidad de manera fidedigna, con “certeza” y “verdad científica”, ya que contiene “elementos objetivos”.

Esta característica del término “Sinn”, que le atribuye Einstein, y que utiliza como criterio de realidad, de “verdad científica” de una teoría física, es aquello en lo que estoy de acuerdo con Einstein y también es lo que justifica el uso que yo hago del término “intuición”, como *elemento gnoseológico o intelectual, ordenador del material sensible, al mismo tiempo que elemento objetivo o físico, perteneciente a la realidad extralingüística*. A ese aspecto es al que me refiero cuando digo que

⁴¹ La cursiva y el subrayado del título alemán y su traducción al inglés son míos.

Einstein fue más allá de lo que fue Heisenberg en el significado del término “contenido intuitivo”, completando su definición. Ahora bien, la manera cómo utiliza su criterio para distinguir tales elementos será analizada posteriormente, pero ya lo he mencionado, es el principio de separabilidad, el cual establece que aquellos elementos son las propiedades espacio-temporales.

En su conferencia titulada “Geometría y experiencia”, del año 1921, Einstein utiliza “contenido intuitivo” en este mismo sentido que yo lo hago, distinguiendo entre “lo lógico-formal” y “el contenido intuitivo”, en un contexto diferente a este otro donde sólo habla de la *naturaleza del nexo* concepto-percepción. Este primer grupo de objetos, los que caen dentro de la categoría lógico-formal, lo caracteriza por ser axiomas “que deben ser considerados en un sentido puramente formal, es decir, vacíos de todo contenido de intuición o experiencia. Estos axiomas son creación libre de la mente humana”. De tal manera que si queremos *llenar* de contenido a estos objetos axiomáticos de la geometría, hemos de relacionarlos con “objetos de la intuición o de objetos reales”, creando un nexo con la realidad física:

“Para poder hacer alguna afirmación, la geometría debe ser desprovista de su carácter meramente lógico-formal mediante la coordinación de los objetos reales de la experiencia con los esquemas conceptuales vacíos de la geometría axiomática”⁴².

Tras este proceso, la “geometría puramente axiomática” se convierte, según Einstein, en una “geometría práctica”, a la cual considera una rama de la ciencia natural, sujeta a verificación experimental. A partir de estas declaraciones suyas, justifica el poder atribuir a la expresión, por él mismo utilizada, de “contenido intuitivo” el significado con que yo lo uso, como aquello que mantiene una conexión entre la teoría (los axiomas, el formalismo matemático...) y la realidad física. Si esta conexión existe, entonces la teoría es completa, porque *describe* dicha realidad.

De esta forma y desde el prisma positivista con el que Einstein mira la interpretación que da Bohr de la física cuántica, aquél jamás convino con el sentido analógico de los términos clásicos, propuesto por Bohr. Para Einstein, el fracaso de la descripción espacio-temporal, que expuse en el tercer capítulo, no puede solucionarse apelando a un nuevo uso y significado de los conceptos, ya que los conceptos deben referirse a los

⁴² EINSTEIN, A., “Geometría y experiencia” (1921), Mis ideas y opiniones, p. 209.

objetos autónomos localizados en el espacio y en el tiempo⁴³ o, si no, están vacíos de contenido físico:

“Pero, este punto de vista positivista primario, cuando es desarrollado de manera consecuente, comporta una debilidad irremediable: obliga a declarar desprovistas de sentido todas las proposiciones que puede expresar el lenguaje. ¿Con qué derecho se puede demandar que la descripción de un resultado singular de una observación tiene un sentido (es verdadero o falso)? ¿Puede una descripción tal no descansar sobre un engaño, o mejor sobre una experiencia individual que se deberá interpretar como el recuerdo de un ideal o como una alucinación? ¿Tiene la distinción entre las experiencias del estado de vigilia y aquéllas del estado de ensueño un sentido objetivo? Finalmente, lo «real» se reduce a las experiencias vividas de un Yo, sin que sea posible producir el menor enunciado a este propósito; al término de un análisis positivista, los conceptos utilizados en los enunciados se revelan, así pues, todos, sin excepción, vacíos de sentido”⁴⁴.

Uno más de los aspectos relacionados con las teorías referencialistas del lenguaje, a los que me referí al principio, es el término “valor cognoscitivo” o “valor veritativo”. Einstein también lo utiliza junto con “contenido de verdad”. Estas expresiones designan aquello que alude al “contenido intuitivo” de una teoría; es decir, cuando los elementos conceptuales de aquélla tienen su contrapartida en los elementos objetivos de la realidad física. Éste es uno de los requisitos de la condición de completud de una teoría y del criterio de realidad de Einstein; el cual también se corresponde, esencialmente, con la “condición semántica” de

⁴³ Es decir, los conceptos han de proporcionar imágenes ostensivas o “clásicas”, si no lo hacen así, convierten a la teoría en algo ininteligible. Tanto Einstein como Bohr pensaban que la comprensibilidad de una teoría venía del uso de las imágenes clásicas (espacio-temporales), sin embargo este último sí confiaba en la inteligibilidad de la mecánica cuántica, conservando estas imágenes, aunque en un sistema conceptual simbólico. Por esta razón, tal doctrina sobre la ininteligibilidad de la mecánica cuántica, que Popper achaca a la interpretación de Copenhague, está más cerca de satisfacer la crítica realista de Einstein que la postura de Bohr: “La perspectiva de que las teorías son *nada más* que instrumentos o artificios para calcular, se ha puesto de moda entre los teóricos cuánticos, debido a la doctrina de Copenhague de que la teoría cuántica es *intrínsecamente ininteligible* porque sólo podemos entender «*imágenes*» *clásicas*, tales como las «imágenes de partículas» o las «imágenes de ondas». Yo creo que esta es una doctrina equivocada e incluso perversa”. POPPER, K., *Teoría cuántica y el cisma en Física*, p. 64.

⁴⁴ EINSTEIN, A., *Réflexions élémentaires concernant l'interprétation des fondements de la mécanique quantique*. En: *Quanta. Mécanique statistique et physique quantique*, p. 251.

Russell: el lenguaje ha de tener una única palabra para referirse siempre al *mismo* y único *objeto*, así conservará el *mismo significado* inambiguo para cualquier hablante y contexto.

“Cierto que los sistemas conceptuales son en sí completamente arbitrarios desde el punto de vista lógico, pero están subordinados a la finalidad de hacer viable una coordinación lo más cierta (intuitiva) y completa posible con la totalidad de las experiencias sensoriales; en segundo lugar, aspiran a la máxima parsimonia con respecto a sus elementos lógicamente independientes (conceptos fundamentales y axiomas), es decir, conceptos no definidos y proposiciones no derivadas.

Una proposición es correcta cuando, dentro de un sistema lógico, está deducida de acuerdo con las reglas lógicas aceptadas. Un sistema tiene contenido de verdad según con qué grado de certeza y completitud quepa coordinarlo con la totalidad de la experiencia. Una proposición correcta obtiene su «verdad» del contenido de verdad del sistema a que pertenece»⁴⁵.

⁴⁵ EINSTEIN, A., Notas Autobiográficas, p. 18. Dada la importancia de este texto lo citaré en el original alemán y en su traducción inglesa: “Das Begriffssystem ist eine Schöpfung des Menschen samt den syntaktischen Regeln, welche die Struktur der Begriffssysteme ausmachen. Die Begriffssysteme sind zwar an sich logisch gänzlich willkürlich, aber gebunden durch das Ziel, eine möglichst sichere (intuitive) und vollständige Zuordnung zu der Gesamtheit der Sinnen-Erlebnisse zuzulassen; zweitens erstreben sie möglichste Sparsamkeit in bezug auf ihre logisch unabhängigen Elemente (Grundbegriffe und Axiome) d.h. nicht definierte Begriffe und nicht erschlossene Sätze.

Ein Satz ist richtig, wenn er innerhalb eines logischen Systems nach den acceptierten logischen Regeln abgeleitet ist. Ein System hat Wahrheitsgehalt, entsprechend der Sicherheit und Vollständigkeit seiner Zuordnungs-Möglichkeit zu der Erlebnis-Gesamtheit. Ein richtiger Satz erborgt seine «Wahrheit» von dem Wahrheits-Gehalt des Systems, dem er angehört”.

En inglés: “The System of concepts is a creation of man together with the rules of syntax, which constitute the structure of the conceptual systems. Although the conceptual systems are logically entirely arbitrary, they are bound by the aim to permit the most nearly possible certain (intuitive) and complete co-ordination with the totality of sense-experiences; secondly they aim at greatest possible sparsity of their logically independent elements (basic concepts and axioms), i.e., undefined concepts and underived {postulate} propositions.

A proposition is correct if, within a logical system, it is deduced according to the accepted logical rules. A system has truth-content according to the certainty and completeness of its co-ordination-possibility to the totality of experience. A correct proposition borrows its «truth» from the truth-content of the system to which it belongs”. EINSTEIN, A., Autobiographical Notes. In: Albert Einstein: Philosopher and Scientist, pp. 12-13 (op. ya citada).

Un aspecto más a destacar: cuando Wittgenstein afirma que aquello que posibilita la conexión entre el término lingüístico y el mundo (la *forma de la representación*) es una isomorfía lógica, una correlación de estructuras de este tipo, también reconoce, al mismo tiempo, que la naturaleza de esta conexión es irrepresentable lingüísticamente y, por lo tanto, extralógica, así pues, sólo puede ser “mostrada” y no “dicha” (a través del lenguaje).

No obstante, esto es una forma de admitir la ignorancia acerca de qué es lo que garantiza el isomorfismo estructural lógico y sólo puede ser postulado, lo cual no permite indagar en su naturaleza; esto mismo fue lo que le ocurrió a Bohr al postular la conexión en mecánica cuántica entre la teoría y la realidad, a través de su compromiso ontológico, y, por lo tanto, su creencia en el contenido intuitivo de aquélla, pero sin poder demostrar nada de esto por no adentrarse, como tampoco hizo Wittgenstein, en los aspectos ontológicos ineludibles que conlleva esta cuestión.

Por el contrario, Einstein pudo afirmar que la forma como la conexión se realiza no es lógica; es de naturaleza intuitiva y con ello admite no sólo que la isomorfía entre lenguaje teórico y realidad física no es una correlación lógica, sino que, además, posibilita la búsqueda ontológica acerca de la naturaleza de dicha conexión, lo cual conduce a preguntarse por el tipo de contenido intuitivo de una teoría: ¿es la característica de la espacialidad la que sustenta a éste?

Todo lo dicho justifica las cuatro tesis iniciales, que he tomado como punto de partida:

1) Toda descripción física ha de ofrecer una representación del mundo físico.

2) Toda representación ha de formarse a partir de, al menos, uno de los dos tipos de intuición: espacial o temporal⁴⁶.

3) Dichas intuiciones son los elementos, tanto intelectuales como objetivos, que componen el contenido intuitivo de las teorías físicas.

4) Dadas las tres tesis anteriores, la pregunta sobre la completud de la mecánica cuántica en la polémica entre Einstein y Bohr gira en torno a la cuestión del contenido intuitivo de las teorías físicas: en el caso de la mecánica cuántica, Einstein sostiene que dicho contenido está vacío porque no le otorga al espacio-tiempo un carácter objetivo, es decir carece de *intuición*. En esto estoy de acuerdo con Einstein y pienso que Bohr estaba equivocado al pretender salvar sólo el aspecto gnoseológico de los

⁴⁶ La cuestión acerca de si ambas formas de intuición son o no son separables formará parte del principal objetivo de análisis del último capítulo.

elementos que caracterizan el contenido intuitivo y negar la posibilidad de conceder *realidad objetiva* a alguna de las *intuiciones*, que son, precisamente, las que *llenan*, dicho *contenido* intuitivo, tal y como la crítica de su oponente sacó a la luz.

6.2) El Sentido de la Polémica: ¿Tiene Contenido Intuitivo la Mecánica Cuántica?

Retrocederé, por un momento, al año 1927. Tanto el objetivo de Bohr, al aportar su solución al problema de la dualidad onda-corpúsculo, como el de Heisenberg cuando planteó sus relaciones de incertidumbre no fue restaurar las imágenes visuales de los objetos atómicos, sino conservar algo del contenido intuitivo de estos modelos espacio-temporales, pero no en toda su plenitud, lo cual nos llevaría, o bien, a la descripción determinista y al representacionismo pictórico de la física clásica, o como mínimo, al realismo espacio-temporal de Einstein. Esto fue lo que ambos científicos sacrificaron en provecho de la interpretación física del formalismo matemático. Antes de 1927 sólo se planteó la cuestión del contenido intuitivo y no el problema del determinismo ni el de la completud; a partir de entonces, esta cuestión se vio ensombrecida por aquellos inconvenientes, que Einstein sacó a la luz. Sin embargo, y aunque tales problemas están íntimamente relacionados con el primero, la raíz de todos ellos siguió siendo la cuestión en torno a la *conexión de la teoría con la naturaleza*: su capacidad para describir y representar físicamente la realidad.

Por esto, mi intención es situar el foco de la discusión de la “Polémica Einstein-Bohr”, sobre la completud de la física cuántica, en el problema de su contenido intuitivo y de la representabilidad del mundo por parte de las teorías físicas. Éste es el único punto donde se da una conexión entre el pensamiento de ambos físicos, ya que Bohr enfoca el debate en términos de una polémica entre determinismo e indeterminismo; en cambio, Einstein reinterpreta las propuestas de Bohr como objeciones fenomenistas a su planteamiento realista. A pesar de esto, anteriormente he argumentado que ambas interpretaciones de la polémica son erróneas, al menos en parte: ni Einstein fue un defensor a ultranza del determinismo, ni Bohr se quedó en el nivel fenomenista, del cual, ciertamente, partió su pensamiento; pero no se atrincheró en él, ya que su doctrina del actor-espectador está orientada hacia cierto tipo de realismo matizado, donde, si bien se postula

la realidad física, como base objetiva del conocimiento físico, no se adentra en consideraciones ontológicas acerca de cómo sea esa realidad⁴⁷.

No obstante, tanto el planteamiento de Einstein (realismo-fenomenismo) como el de Bohr (determinismo-indeterminismo) no llevan más que a un callejón sin salida, ya que sus puntos de partida son contrarios e irreconciliables. Sin embargo, sí hay un punto en común, a partir del cual podemos interpretar la polémica en la búsqueda de una solución crítica y racional, que no sea el mero hecho de tomar partido por uno o por otro, aceptando el principio epistemológico, que cada uno de ellos asumió. Hasta ahora se ha visto que en todas las explicaciones y justificaciones que daban ambos de sus posturas había un recurso constante a sus diferentes puntos de partida o principios epistemológicos. Esta situación no puede quedar así; ha de haber un punto en común entre ellos, a partir del cual se pueda iniciar una solución a la polémica.

Este aspecto, que propongo, es el del contenido intuitivo de las teorías físicas, que comienza siempre por una reflexión acerca de los conceptos descriptivos de la física, en este caso por las magnitudes de espacio y tiempo. Más atrás expuse una aproximación a esta cuestión, la cual culminará en este capítulo.

a) *El requisito de Einstein para la intuición física: la intuición espacial como elemento objetivo de la realidad y base de su realismo crítico*

En el capítulo anterior adelanté que el valor físico del principio de separabilidad espacial era fundamental para Einstein porque es el requisito básico para dictaminar si una teoría posee, o no, contenido intuitivo, esto es, si contiene o carece de los elementos objetivos, espacio-temporales, que se precisan para describir físicamente la realidad: la espacialidad objetiva y “real” del mundo físico es su condición, tanto para la completud de una

⁴⁷ A nadie que haya estudiado la Polémica Einstein-Bohr, desde Ehrenfest, quien la presencié *in situ* durante las Conferencias Solvay, o Pais que tuvo un trato personal con ambos, hasta Jammer o Sachs, le ha pasado inadvertido el hecho de que Einstein y Bohr hablaban de cosas muy distintas y, por tanto, no hubo una buena comunicación entre ellos ni un auténtico intercambio de ideas. Cada uno plantea el *problema* desde su propio enfoque. Mi objetivo consiste en dilucidar cuál era exactamente ese problema y hacer un planteamiento de aquél lo más arbitrario posible, es decir, sin dejarme arrastrar por la dinámica argumentativa de ninguno de los dos. Para ello, partiré de la siguiente propuesta ya mencionada con anterioridad: el problema sobre el que se está debatiendo es, en última instancia, el del contenido intuitivo de las teorías y su conexión con la realidad.

teoría física como para la cuestión del contenido físico o *intuitivo* de los conceptos teóricos, la conexión de los conceptos con los objetos extralingüísticos de la realidad.

De ahí que Einstein reafirme su convicción acerca de la incompletud de la descripción mecánico-cuántica, ya que carece de veracidad, o como también dice de *sentido* o *contenido*, al no creer en su conexión, que Bohr defiende que sí tiene, con el resto de las teorías ni con *la totalidad de la experiencia*; es decir, con los conceptos clásicos que son, en último término, los únicos capaces de describir aquella experiencia, gracias a su doble carga, empírica y teórica:

“Los conceptos sólo pueden adquirir contenido cuando están conectados con la experiencia sensorial, aunque sea de una forma indirecta. Pero ninguna investigación lógica puede revelar esta conexión, que únicamente puede advertirse a través de la experimentación. No obstante, esta conexión es la que determina el valor cognoscitivo de los sistemas conceptuales. (...) Los conceptos tienen la experiencia sensorial como punto de referencia pero, en un sentido lógico, jamás pueden ser deducidos a partir de ella. Por este motivo, jamás me ha sido posible comprender la búsqueda de un «a priori» en el sentido kantiano. En cualquier problema ontológico nuestro único interés estará en descubrir dentro del conjunto de las experiencias sensoriales aquellas características a las cuales se refieren los conceptos”⁴⁸.

¿Cómo consigue justificar esta postura crítica hacia la mecánica cuántica? Recapitulemos, para él, la doctrina de Bohr del actor-espectador se aleja del programa realista⁴⁹, ya que su criterio ontológico está basado en la creencia de un mundo objetivo, que existe al margen de toda intervención humana, donde se producen los procesos físicos en un marco espacio-temporal objetivo e independiente de la observación, cuya evolución obedece a leyes causales mecánicamente determinadas. Por lo tanto, se trata de un mundo objetivo, determinista e independiente de la observación.

Einstein está convencido de que este programa es realizable en el mundo microfísico si renunciamos al atomismo clásico, esto es, a la

⁴⁸ EINSTEIN, A., *El problema del espacio, el éter y el campo, en la física* (1934), *Mis ideas y opiniones*, pp. 248-249.

⁴⁹ Es decir, de la posibilidad de describir la realidad en sí misma, independiente, y que, de esta forma, hable de “hechos”, de lo fáctico, y no tan sólo de probabilidades (de realización).

localización de las partículas, en favor de una teoría del continuo, donde las características atómicas se expresan, sin determinar su *localización puntual*, a través de leyes integrales, que obedecen a ecuaciones de campo: las funciones continuas del espacio sustituyen al punto material, al corpúsculo. Se ha de explicar la estructura atómica de la materia y de la energía por funciones continuas (campos).

En su alternativa a la física cuántica, apelará a la simplicidad teórica: los conceptos matemáticos más simples y el limitado número de campos y de ecuaciones simples. Esta simplicidad es la clave para alcanzar y captar la realidad, pues nos indica el “camino correcto”, tras haber introducido la creatividad en la ciencia⁵⁰. El encadenamiento de ideas por el que llega a esto, lo recorre a través de un análisis acerca de las *relaciones* entre el *contenido de la teoría* y el *conjunto de los hechos empíricos*, que nos revela la “antítesis entre los dos componentes inseparables de nuestro conocimiento: lo empírico y lo racional”⁵¹.

Según Einstein, hay una *primera verdad*, que es el triunfo de la razón a través de las matemáticas: esto nos facilita el disponer de un sistema lógico, racional, para captar la realidad. La *segunda verdad* es que “todo conocimiento de la realidad comienza en la experiencia y desemboca en ella”⁵². Dada la segunda verdad, ¿cuál es, entonces, la función de la razón? Su respuesta es que tal función consiste en crear conceptos y leyes fundamentales y, aunque sus conclusiones deben cotejarse y coincidir con la experiencia, se obtienen por deducción lógica. Ahora bien, estos conceptos y postulados fundamentales no pueden ser derivados de la experiencia ni tampoco por medios lógicos⁵³. Son, desde el punto de vista lógico, invenciones libres del intelecto humano:

“La estructura del sistema (teórico de la física) es resultado del trabajo de la razón; el contenido empírico y sus mutuas relaciones deben hallar su representación en las conclusiones de la teoría. En la posibilidad de tal representación está contenido el único valor y la justificación de todo el sistema, y en especial la de los conceptos y principios fundamentales que lo sustentan. Más allá de esto, dichos principios fundamentales son

⁵⁰ Ver, por ejemplo, EINSTEIN, A., “Sobre el método de la física teórica” (1933), Mis ideas y opiniones, p. 246.

⁵¹ *Ibid*, p. 243.

⁵² Cf. *Ibid*, pp. 242-243. En estas páginas pone como ejemplo de la primera aseveración la geometría de Euclides y el método experimental de Galileo como paradigma de la segunda.

⁵³ Con esto dice “no” al método inductivo y al apriorismo kantiano.

invenciones libres del intelecto humano, que no pueden ser justificadas ni por la naturaleza de ese intelecto ni de ninguna otra manera apriorística.

Estos conceptos y postulados fundamentales, que no pueden ya ser reducidos lógicamente, forman la parte esencial de una teoría, un núcleo que la razón no alcanza a comprender. El objetivo principal de toda teoría es lograr que esos elementos irreducibles sean tan simples y tan pocos en cantidad como sea posible, sin tener que renunciar a la representación adecuada de ningún contenido empírico⁵⁴.

El equilibrio que Einstein mantiene entre realismo y empirismo significa lo siguiente: el principio creativo reside en la matemática y, por tanto, en la razón, el pensamiento puro, aunque la experiencia es el criterio último de utilidad física de una construcción matemática. La verdad está en la simplicidad siempre y cuando se adecue a la experiencia; la contrastación experimental es un paso básico y necesario, pero no suficiente para alcanzar la verdad, para captar y representar la realidad. Este rasgo racionalista, que Einstein introduce en su credo epistemológico, es el que le diferencia de Bohr:

“Hasta el momento presente nuestra experiencia nos autoriza a creer que la naturaleza es la realización de las ideas matemáticas más simples que se puedan concebir. Estoy convencido de que, por medio de construcciones puramente matemáticas, podemos descubrir los conceptos y las leyes que los conectan entre sí, que son los elementos que proporcionan la clave para la comprensión de los fenómenos naturales. La experiencia puede sugerir los conceptos matemáticos apropiados, pero éstos, sin duda ninguna, no pueden ser deducidos de ella⁵⁵”.

Desde este punto de vista se comprende que Einstein no admitiera la revisión, propuesta por Bohr, de los marcos conceptuales. Para Bohr las relaciones entre los conceptos dentro de un determinado marco teórico nos vienen dadas por la experiencia: cuando ésta se amplía, el marco conceptual cambia y se ensancha para dar cabida a los nuevos fenómenos; el postulado cuántico y la discontinuidad se introdujeron de esta forma en el nuevo marco, es decir, a través de la experiencia. Para Einstein, estas relaciones las establece la razón, por tanto, él defiende la noción de campo y de

⁵⁴ *Ibid*, p. 244.

⁵⁵ *Ibid*, p. 245.

continuidad, porque con ellos se explica la electrodinámica y la gravedad, además de la aspiración de éste a explicar la materia y la energía desde una nueva teoría del campo único; por tanto, son los conceptos más simples. De esta forma niega que el postulado cuántico sea una característica esencial de la naturaleza, ya que aquello que nos acerca a la verdad, es decir, lo real, es la simplicidad: y el modelo de continuidad es el más simple.

Si este racionalismo de Einstein es el rasgo de su pensamiento que más le distancia del pensamiento de Bohr, también es lo que le conmina a defender la realidad de los conceptos espacio-temporales. Para que una teoría tenga contenido intuitivo, conexión con la realidad, ha de contener elementos perceptivos (aprehensivos y comprensivos), que han de basarse en una forma de ordenación, lo que se suele denominar una “intuición intelectual”; este aspecto es lo que otorga objetividad (elementos objetivos) a una teoría física porque tales elementos los encontramos también en la realidad; de ahí la conexión entre teoría y mundo.

Pues bien, Einstein tenía razón, al menos parcialmente, al proponer un retorno a la intuición espacio-temporal. No obstante, el fracaso de la descripción espacio-temporal en física cuántica originó el problema de que el acceso directo a esta intuición espacial está cerrado; Bohr sólo pudo alegar que, de forma indirecta, el acceso se puede realizar desde un uso analógico, propuesto por el principio de correspondencia, de los conceptos que contienen tal intuición (contenido intuitivo)⁵⁶.

Por su parte, Einstein estaba dispuesto a admitir una conexión indirecta entre los conceptos de la teoría y la realidad; pero, nunca le satisfizo la propuesta de Bohr porque carecía de una justificación filosófica acerca de los requisitos gnoseológicos, desde los que el propio Einstein había planteado el problema de la intuición física, que en su propuesta sí habían sido satisfechos a partir de una intuición espacial y, por tanto, se había recuperado un modelo geométrico⁵⁷. Por este motivo, defendiendo la siguiente tesis: Einstein ofreció una “fundamentación intuitiva”, basada en

⁵⁶ En el siguiente capítulo, revisaré esta postura de Bohr, porque si bien el camino directo a la intuición espacial está bloqueado, no lo está a la intuición temporal, desde la cual se puede acceder a la primera de manera indirecta a través de un uso analógico con respecto al significado clásico de las propiedades mecánicas que se forman a partir de dichas intuiciones; pero esta posibilidad sólo puede estar garantizada, si se quiere defender el contenido intuitivo de la nueva física, desde el carácter ontológico de la intuición temporal, como elemento objetivo de la realidad y no sólo fenoménico.

⁵⁷ Cf. “Apéndice: La teoría del campo único de Einstein”, donde relaciono la manera cómo satisfizo, teóricamente, tales requisitos en su propuesta de un *campo único*.

la representación espacial de los sistemas, de su alternativa a la física cuántica, mientras que el “simbolismo analógico” de Bohr carece de cualquier tipo de “fundamentación intuitiva”, o, al menos, se trata de una fundamentación abstracta, vacía de cualquier tipo de intuición⁵⁸, a la que sólo apela como condición de sentido para su marco conceptual.

Además, Einstein también renunció, como hace la mecánica cuántica, a precisar la localización puntual de una partícula. Su teoría de campos persiste en el empeño de poder representar el carácter atómico de la materia y de la energía a través de funciones continuas en el espacio; sin embargo, aquello que nunca admitirá será que estas funciones sólo representen probabilidades y no la estructura espacio-temporal (real-objetiva) del mundo físico.

Una vez más, puede verse que la gran objeción de Einstein a la física cuántica no era el indeterminismo, que se derivaba del carácter estadístico de esta teoría, sino su incapacidad para ofrecer una descripción espacio-temporal, geométrica y físicamente real, de los sistemas y no una simple probabilidad⁵⁹. A continuación reproduzco íntegramente el texto de Einstein que, a pesar de su larga extensión, es donde más claramente resume esta situación:

“Entre tanto, el mayor inconveniente que se opone a una teoría de campos de esta clase reside en la concepción de la estructura atómica de la materia y la energía. Esto ocurre porque la teoría no es atómica en sus fundamentos, en la medida en que opera en forma exclusiva con funciones continuas del espacio, en contraste con la mecánica clásica, cuyo elemento más importante -el punto material- justifica por sí mismo la estructura atómica de la materia.

La moderna teoría cuántica en la forma caracterizada por de Broglie, Schrödinger y Dirac, que opera con funciones continuas, ha superado estas dificultades gracias a una atrevida interpretación que fue formulada, por primera vez, por Max Born. Según dicha interpretación, las funciones espaciales que aparecen en las ecuaciones no pretenden ser un modelo matemático de la estructura atómica. Esas funciones, se supone, sólo determinan las probabilidades matemáticas de hallar tales estructuras, si se han hecho las correspondientes mediciones en un punto particular o en cierto estado dinámico.

⁵⁸ “Intuición” como elemento, gnoseológico e intelectual, ordenador del material sensible al mismo tiempo que elemento objetivo y físico, perteneciente a la realidad extralingüística.

⁵⁹ Aunque admito que las dos cuestiones están entrelazadas, no son idénticas.

Esta interpretación no admite objeciones desde el punto de vista lógico y tiene a su favor importantes éxitos. Sin embargo y por desdicha, obliga a utilizar un continuo con un número de dimensiones (cuatro) que la física hasta ahora no atribuye al espacio y que se eleva indefinidamente con el número de partículas que constituyen el sistema considerado⁶⁰. No puedo menos que confesar que sólo confiero una importancia transitoria a esta interpretación. Aún creo que es posible un modelo de la realidad, o sea una teoría que represente las cosas en sí mismas y no tan sólo la probabilidad de su aparición.

Por otra parte, estoy seguro que debemos abandonar la idea de describir la localización completa de las partículas en un modelo teórico. Según mi punto de vista, ésta es la secuela permanente del principio de incertidumbre de Heisenberg. Pero una teoría atómica en el verdadero sentido de la expresión (no meramente sobre la base de una interpretación)⁶¹, sin localización de las partículas en un modelo matemático, es perfectamente concebible. Por ejemplo, para fundamentar el carácter atómico de la electricidad, las ecuaciones de campo tan sólo deben conducir a las siguientes conclusiones: una región del espacio tridimensional, en cuyo contorno la densidad eléctrica desaparece en forma sistemática, siempre contiene una carga eléctrica total cuya dimensión está representada por un número entero. Por lo tanto, en una teoría del continuo las características atómicas se expresarían de una manera satisfactoria a través de leyes integrales sin determinar la localización de las entidades que constituyen la estructura atómica.

No consideraré resuelto el enigma cuántico hasta que una estructura atómica haya sido representada de esa manera”⁶².

A pesar de la sensatez y del grado de razón que posee este argumento de la postura de Einstein, he de examinar la siguiente objeción: si la estructura del campo gravitatorio sólo se representa con una geometría

⁶⁰ Pienso que aquí Einstein está en lo cierto, cómo una teoría física puede situar sus fenómenos en un espacio de configuración, un espacio abstracto, el espacio de Hilbert; la física cuántica no dio el gran paso, que protagonizó la relatividad general, uniendo física y geometría. En la teoría cuántica no existe el espacio físico; no ofrece una *reconstrucción* (o *mapa*) geométrico del mundo atómico.

⁶¹ Evidentemente, Einstein se refiere a una teoría sobre el mundo atómico que no tiene por qué ser atomista (atomística).

⁶² EINSTEIN, A., “Sobre el método de la física teórica” (1933), Mis ideas y opiniones, p. 247.

no euclídea⁶³, entonces ¿es este espacio visualmente representable tal y como Einstein le exigía a una teoría para que ésta tuviera contenido intuitivo? Lo primero que se ha de mencionar es que Einstein pensaba en la geometría de Riemann como una generalización de la geometría de Euclides⁶⁴ y él mismo responde así a la pregunta que he formulado:

“Según el punto de vista aquí invocado, el problema de si el continuo tiene una estructura euclidiana, riemanniana u otra de naturaleza distinta, es una cuestión estricta de la física, que ha de ser contestada por la experiencia y no una cuestión de convención elegida sobre la base de la mera conveniencia. La geometría de Riemann tendrá validez si las leyes de localización de los sólidos prácticamente rígidos se acercan a las de la geometría euclidiana tanto más de cerca cuanto menores sean las dimensiones de la región de espacio-tiempo que se tome en consideración”⁶⁵.

Sin embargo, el balance que hace a continuación acerca de la situación de la microfísica en relación con la geometría no es tan positivo:

“Es verdad que esta interpretación física de la geometría se desbarata cuando se la aplica inmediatamente a espacios de orden de magnitud submolecular. Pero no obstante, aun en cuestiones tales como la constitución de partículas elementales, retiene una parte de su significación. Porque incluso cuando se trata de describir las partículas elementales eléctricas que constituyen la materia, se puede hacer el intento de otorgar significado físico a esos conceptos de campo, que han sido definidos físicamente con el fin de describir el comportamiento geométrico de los cuerpos que son grandes en comparación con la molécula. Sólo el éxito puede justificar ese intento, que postula realidad física para los principios fundamentales de la geometría de Riemann, fuera del dominio de sus definiciones físicas. Es posible que se descubra

⁶³ “La significación objetiva del espacio y del tiempo se encuentra, en primer lugar, en el hecho de que el *continuum* tetradimensional es hiperbólico”. EINSTEIN, A./ BESSO, M., Correspondencia con Michele Besso, p. 134, carta 27 de Einstein, fechada el 31 de octubre de 1916.

⁶⁴ Cf. EINSTEIN, A., “Geometría y experiencia” (1921), Mis ideas y opiniones, p. 211. Y en la siguiente página explica cómo se realiza tal generalización: “La geometría de Riemann tendrá validez si las leyes de localización de los sólidos prácticamente rígidos se acercan a las de la geometría euclidiana tanto más de cerca cuanto menores sean las dimensiones de la región de espacio-tiempo que se tome en consideración”.

⁶⁵ *Ibid*, p. 212.

que esta extrapolación no tiene más fundamento que la extrapolación del concepto de temperatura a partes de un cuerpo de orden de magnitud molecular”⁶⁶.

Es cierto que Einstein tuvo que renunciar a la geometría de Riemann para alcanzar este objetivo en la esfera atómica, pero lo siguió intentando con otros tipos de geometría, lo cual nos inclina a pensar que sus objeciones a la física cuántica incluían la falta de una geometría del mundo atómico, la cual obtendríamos si no estuviéramos, en palabras de Einstein, tan *“lejos de poseer un conocimiento tan seguro de los principios teóricos de la estructura atómica que nos capacite para construir teóricamente cuerpos sólidos y relojes a partir de conceptos elementales”*.

Por tanto, la estructura del continuo espacio-temporal en un orden de magnitud cósmica, es decir la estructura espacial del universo, no es euclídea. Entonces, ¿cómo puede ser visualizada? Einstein responde:

“En primer término, corresponde hacer una observación de naturaleza epistemológica. Una teoría geométrico-física como tal no puede ser directamente ilustrada, toda vez que se trata meramente de un sistema de conceptos. Pero estos conceptos tienen por objetivo aportar a la mente una multiplicidad de experiencias sensoriales reales o imaginarias. Por lo tanto, «visualizar» una teoría significa proporcionar a la mente esa abundancia de experiencias sensibles con respecto a las cuales la teoría ofrece una ordenación esquemática”⁶⁷.

Tras esta advertencia, se propone demostrar que no sólo podemos imaginar una superficie esférica de dos dimensiones, sino también de tres. No reproduciré la explicación que, de una manera tan lúcida, elabora Einstein⁶⁸; sólo mencionaré la razón por la cual es posible tal visualización, tan alejada del marco espacial de la física clásica, es decir, de la geometría euclídea. La explicación dice así: con la ayuda de “las leyes de localización de figuras rígidas”, es posible transferir una representación bidimensional de “la geometría esférica sobre el plano” al “ámbito tridimensional de la geometría esférica”, del mismo modo que cuando

⁶⁶ *Ibid*, pp. 210-211.

⁶⁷ *Ibid*, p. 214.

⁶⁸ Un estudio pormenorizado de esta conferencia se halla en: PATY, M., Einstein Philosophie, pp. 296-319. Otra referencia, más breve, a dicha conferencia la encontramos en: MERLEAU-PONTY, J., Albert Einstein. Vida, obra y filosofía, pp. 280-283.

trazamos sobre un plano un dibujo unidimensional que representa una imagen bidimensional; ahora se trata de subir un peldaño más y, a partir de la imagen bidimensional, construir mentalmente la representación tridimensional⁶⁹.

De modo que esta visualización de la geometría riemanniana, que rige la estructura del universo, es una representación espacio-temporal como lo era la visualización que nos ofrecía la geometría euclídea; pero tal tipo de representación es la que ha cambiado: el espacio ni es plano, ni rígido, ni homogéneo⁷⁰; como tampoco es independiente del tiempo. Se recordará que es lícito identificar el término “intuición” con el de “representación”, la cual puede ser de dos tipos, simbólica y ostensiva (aunque también pictórica o visual); la referencia en el mundo de la primera es indirecta o *analógica*, la referencia de la segunda es directa (el objeto se nos manifiesta tal cual es).

De tal forma, que si la representación puede ser tanto directa como indirecta, resulta que este término, y por extensión el de “intuición”, puede entenderse como “forma de ordenación” del material sensible, sea del tipo que sea. Ahora bien, si el espacio de Einstein ya no es el de la física clásica (no es el de Newton ni el de Maxwell) y la geometría del universo ya no es la euclídea, ¿de qué modo garantiza él que su teoría de la relatividad general sea intuitiva, es decir, que represente la realidad dando una descripción espacio-temporal de los fenómenos, a través de modelos pictóricos, visuales u ostensivos?

Al final, el espacio de Einstein, o mejor el continuo espacio-temporal, sólo se define por ser aquello que mantiene un orden de coexistencia. Es cierto que el espacio ya no puede volver a ser una red de conexiones instantáneas debido a la relativización de la simultaneidad, que introduce la teoría de Einstein; por ello esta forma de “ordenación” ya no se conformará más a través de la concepción clásica de espacio ni tiene por qué obedecer únicamente a las leyes euclídeas. Pero puede ser visualizado gracias a ellas, como explica en el año 1921 en la conferencia pronunciada ante la Academia Prusiana de Ciencias, donde, al final, concluye:

⁶⁹ Cf. EINSTEIN, A., “Geometría y experiencia” (1921), *Mis ideas y opiniones*, pp. 215-219.

⁷⁰ Sólo es homogéneo en las proximidades de un punto S del espacio, “lo que equivale a decir que las mismas configuraciones esféricas son posibles en las cercanías de cada punto”. *Ibid*, pp. 218-219.

“De esta manera, utilizando como punto de apoyo la práctica que para pensar y para visualizar nos ha dado la geometría euclidiana, hemos configurado una imagen mental de la geometría esférica. Nos sería posible, sin demasiadas dificultades, otorgar mayor profundidad y vigor a estas ideas realizando construcciones imaginarias especiales. Tampoco sería difícil representar, de una manera análoga, lo que se ha denominado geometría elíptica. Hoy, mi único objetivo ha sido demostrar que la facultad humana de visualización no está condenada a rendirse ante la geometría no euclidiana”⁷¹.

Sin embargo, dado que la simultaneidad no es abolida del todo, el orden de coexistencia se mantiene dentro del intervalo espacio-temporal entre dos sucesos, que es un invariante, es decir, absoluto. De ahí que Einstein conceda una prioridad ontológica al espacio respecto del tiempo y, en cierto sentido, podemos afirmar, en contra de Čapek, que Einstein “espacializa” el tiempo y concibe el universo a la manera parmenídea, como destaca Popper. Dentro de este continuo tetradimensional el tiempo no tiene una realidad separada del espacio y en este sentido es una coordenada más (del campo). Por esto, Einstein espacializa el tiempo en la teoría de la relatividad porque para él es mucho más importante la simultaneidad, entendida como un factor de la coexistencia, que la sucesión dinámica que implica el carácter puramente temporal de los fenómenos.

Puede que surjan protestas contra esta afirmación, pero se ha de tener en cuenta que Einstein no pretende abolir del todo el término “simultaneidad”, sólo lo relativiza en función de los sistemas de referencia. Con esto me enfrento a la tesis de Čapek, quien afirma lo contrario: es cierto que la yuxtaposición simultánea, absoluta, de partes espaciales sin referencia alguna al transcurso temporal es una concepción clásica del espacio, propia de Euclides y de Newton, y que fue superada por la teoría de la relatividad, pero exagera al afirmar que Einstein concedió una prioridad ontológica al tiempo⁷². Como ya se ha visto, el espacio no-euclídeo de Einstein ya no es inmutable, rígido, pasivo ni homogéneo (plano). Sin embargo, aunque Čapek tenga razón al afirmar que la teoría de la relatividad no debe ser entendida a partir de una espacialización del tiempo y que este error deviene de malinterpretar los diagramas espacio-temporales de Minkowsky, lo cierto es que Einstein cayó en este error y

⁷¹ *Ibid*, p. 219. Un breve extracto de esta conferencia también se incluye en: FRENCH, A.P., *Einstein. A centenary volume*, pp. 294-297.

⁷² Cf. ČAPEK, M., *El impacto filosófico de la física contemporánea*, pp. 172-207.

concluyó que “el tiempo era una ilusión”, al menos hasta 1949, cuando sostuvo una charla con Popper en relación con el tema de la realidad del tiempo y del cambio. Durante este encuentro Popper intentó convencerle de que la idealización del tiempo conduce a un idealismo ajeno al realismo que Einstein pretendía defender y que admitir la realidad del tiempo y de los cambios no implicaba una modificación de su crítica a la completud de la mecánica cuántica. De esta conversación se deduce que aquél basaba su realismo en el concepto de espacio, o al menos, en el continuo tetradimensional. Popper acabó llamándole “Einstein-Parménides”, pues, en efecto, si se elimina el carácter real del tiempo, el universo se convierte en un universo cerrado con las características del ser Inmutable, Eterno y Uno de Parménides⁷³.

Es posible que Einstein cambiara de opinión más tarde, pero esto no desmiente que la postura realista que mantuvo siempre se derivara, sobre todo, del concepto de espacio, siendo irrelevante si el tiempo era o no una ilusión, pues este espacio se definía desde el continuo tetradimensional, el tiempo sólo podía tener realidad en su unión con el espacio (y viceversa porque no existe el espacio vacío, sin campo).

Por este motivo, Einstein no concedió prioridad ontológica al tiempo sino al espacio, o bien a ninguno de los dos, aunque estoy de acuerdo con Căpek en lo siguiente: la teoría de la relatividad se debe entender desde la prioridad ontológica del tiempo en la asimetría entre espacio y tiempo, pues tanto la simultaneidad como el orden temporal sólo son relativos cuando los sucesos no están causalmente relacionados o, sólo en cuanto al valor de la simultaneidad, cuando son heterotópicos, que ocurren en lugares separados por diferentes líneas del universo; en cambio, ambos conceptos son absolutos, es decir, “*topológicamente invariantes* con respecto a todos los posibles marcos de referencia”, cuando los sucesos son isotópicos, que caen dentro de la misma línea del universo, o cuando, sólo en el caso de la sucesión (u orden temporal), tienen conexión causal a pesar de ser heterotópicos porque no se ha de confundir la *variancia métrica* con *invariancia topológica*⁷⁴.

Desde esta última consideración, sobre las demás, se admite que el tiempo, como orden de sucesión, tiene tanta realidad como el espacio, en tanto orden de coexistencia, o incluso más, tal y como defiende Căpek, ya que en este caso, cuando los sucesos son heterotópicos, la simultaneidad,

⁷³ CF. POPPER, K., Búsqueda sin término, pp. 171-177.

⁷⁴ Cf. CĂPEK, M., El impacto filosófico de la física contemporánea, pp. 178-180.

como forma de ordenación temporal relacionada con el espacio (pues se trata de la simultaneidad de dos sucesos localizados en ciertas regiones espaciales), es relativa pero no la sucesión temporal.

Einstein debió haber concedido esta realidad al transcurso temporal como otro punto de apoyo a su tesis de la inviolabilidad del principio de separabilidad espacial, ya que, sólo si los sucesos heterotópicos no están causalmente vinculados, a la fuerza han de mantener su independencia espacial unos respecto a otros y si lo están, entonces hemos de poder establecer esa causa que, por definición del postulado de la constancia de la velocidad de la luz, no puede ser instantánea, superior a c . De esta manera, si los sistemas A y B del experimento EPR están suficientemente separados, es decir, cuya distancia sea superior a la que puede recorrer la luz en un tiempo determinado por el experimento, toda conexión causal queda excluida y los sucesos que ocurran en uno son independientes de los que ocurran en el otro: son sucesos heterotópicos, donde tanto la simultaneidad como la sucesión temporal son relativas a cada sistema de referencia; si no interviene c , no hay ninguna otra conexión; no existe la acción a distancia sin conexión causal; no existe la “acción telepática” o las “acciones fantasmas”.

De cualquier forma, cuando Einstein introduce la curvatura espacial, convirtiendo la estructura del espacio en una estructura variable y topológica, plantea un grave problema a su representación intuitiva; de manera que su defensa del contenido intuitivo de los conceptos, y en concreto del espacio-curvo, le acerca a la concepción de un sentido simbólico como el de Bohr porque su referencia ya no es directa, ya no se corresponde con nuestra forma habitual de ordenación perceptual, ya no coincide con el espacio de nuestra percepción, debido al grado de abstracción que los conceptos van adquiriendo a medida que la ciencia evoluciona, pues lo hace hacia una mayor complejidad conceptual:

“La física constituye un sistema lógico de pensamiento que está en estado de evolución, cuyas bases no pueden destilarse -por así decirlo- de la experiencia mediante un método inductivo, sino que sólo pueden ser obtenidas por libre invención. La justificación (contenido de verdad) del sistema reside en la verificación de sus conclusiones por los sentidos, motivo por el cual la relación de éstos con aquéllas sólo puede ser captada en forma intuitiva. La evolución de la ciencia avanza en la dirección de una creciente simplicidad de la base lógica. Con el fin de lograr una mayor aproximación a ese objetivo tenemos que aceptar que la base lógica se separe más y más de los hechos de la experiencia y que el camino mental que une los fundamentos de la física con sus

conclusiones, que se correlacionan con las experiencias sensoriales, se alargue y se dificulte de modo continuo”⁷⁵.

De modo que, cuando Einstein insiste en que la mecánica cuántica no “describe la realidad”, pues tan sólo habla de probabilidades, y que debemos buscar un “modelo de realidad”, no puede referirse al modelo pictórico y especular de la física clásica, ya que admite que la física avanza hacia una mayor complejidad conceptual en el sentido de que los conceptos se alejan de nuestra experiencia ordinaria⁷⁶; sin embargo aquél modelo ha de ser espacio-temporal. ¿Se está refiriendo Einstein a un “modelo geométrico” sea del tipo que sea? Es posible; ya que el espacio como un *continuo* implica la realidad geométrica del primero, puesto que se le pueden atribuir coordenadas o, como dice Einstein, “una estructura métrica”:

“Así nos vemos llevados a la teoría de campo de la electricidad y, más adelante, a procurar que la base de la física entera sea el concepto de campo (después de una tentativa de compromiso con la mecánica clásica). Este esfuerzo conduce a la teoría de la relatividad (evolución de la noción de espacio y de tiempo hacia la de un *continuo con una estructura métrica*”⁷⁷.

Este nuevo tipo de representación espacio-temporal exige un mayor grado de abstracción mental, cuyo contenido intuitivo, su conexión con la realidad y, por tanto su grado de validez, se mide en función del grado de inteligibilidad que nos aporta sobre el mundo y de la ausencia de

⁷⁵ EINSTEIN, A., “Física y realidad” (1936), *Mis ideas y opiniones*, pp. 290-291.

⁷⁶ El espacio de nuestra percepción se corresponde con el espacio plano de la geometría de Euclides; en cambio el marco espacio-temporal de la relatividad es curvo y riemanniano. Pero, aún así, Einstein sigue sosteniendo que es visualizable e intuitivo, por lo tanto, no puede identificar estas características con el proceso de visualización de la mecánica clásica ni con nuestra forma de percibir el mundo cotidiano. Esto es lo que le lleva a admitir que los conceptos de las nuevas teorías tienen un significado “indirecto” y más abstracto que en la física tradicional, sin embargo han de seguir haciendo referencia al mundo y con él al marco espacio-temporal, como elemento objetivo de aquél, aunque el espacio ya no sea euclídeo, el más “visual” que podamos concebir porque se corresponde con nuestro espacio de percepción. Por este motivo, sostengo que su realismo está basado en la intuición espacial, como forma de ordenación del material sensible y no como aquello que nos ofrece un modelo pictórico y especular de la realidad, puesto que su referencia ya no es directa.

⁷⁷ EINSTEIN, A., “Física y realidad” (1936), *Mis ideas y opiniones*, p. 291. (La cursiva es mía).

contradicciones entre la teoría y las progresivas experiencias⁷⁸. Pero, ¿acaso, no era éste el criterio que también utilizó Bohr?

En efecto, así es; pero la diferencia está en que Einstein le añade su férrea convicción en que el marco espacio-temporal es un elemento objetivo de la teoría, el continuo espacio-tiempo es un elemento “real”, que encontramos en el mundo al margen de su observación y que no puede ser interpretado desde el prisma fenomenista de Bohr. De ahí que, para Einstein, un cierto tipo de visualización, en el sentido de representación ostensiva en el espacio-tiempo (geométrico) con carácter objetivo, aún pueda mantenerse en física y, es más, que deba emplearse si es que queremos ofrecer una descripción física de la realidad.

De nuevo, otras consideraciones distintas nos llevan al punto clave del desacuerdo entre Bohr y Einstein: aquello que éste le exige a una teoría física para que tenga contenido intuitivo es que la base intuitiva de la teoría sea la intuición espacial, como forma de ordenación (geométrica), para que la teoría pueda ofrecer modelos visuales de la realidad. En cambio, Bohr entiende que el contenido intuitivo puede prescindir de la visualización espacial y construirse sobre una analogía con respecto a ella, sin conceder realidad alguna ni al espacio ni al tiempo como formas de ordenación y elementos objetivos; aquella analogía, únicamente, permite un uso simbólico de los conceptos *fenoménicos* de espacio y tiempo.

Gracias a lo anterior, Einstein puede entender de esta manera el sentido del término “intuitivo”: un concepto es intuitivo cuando representa propiedades físicas con una existencia autónoma en un marco espacio-temporal continuo; es decir, un objeto físico es real y una magnitud tiene sentido físico, o es intuitiva, cuando se respetan las condiciones que impone el principio de “separabilidad espacial”. De modo que las condiciones para que un objeto sea real y para que un concepto tenga sentido físico o intuitivo son las mismas. Objetividad y capacidad intuitiva están unidas y no es por casualidad, pues el criterio de realidad subyace tanto en una como en otra.

Así, se obtiene una noción de “intuición” que está conectada con nuestra forma de percibir el mundo y ésta se construye sobre la noción de objetividad clásica y sobre la percepción espacio-temporal. Aquí he de dar la razón a Einstein e incluso Bohr estaba de acuerdo en esto; es más, es la

⁷⁸ Por ejemplo, en sus *Notas autobiográficas* escribe: “... todo nuestro pensamiento es de esta especie, la de un juego libre con conceptos; la justificación del juego reside en el grado de comprensión que con su ayuda podemos adquirir sobre las experiencias de los sentidos”. EINSTEIN, A., *Notas autobiográficas*, p. 14.

razón por la cual éste se refiere al espacio y al tiempo como nuestras “formas de intuición”, pero recuérdese que no guardan ninguna relación con la terminología kantiana, pues no son *formas a priori*, sino, simplemente diferentes maneras de ordenación.

La acusación de Einstein está fijamente arraigada en este punto: Bohr ha prescindido de la característica más básica e irrenunciable de la física, que es la descripción de la realidad, ya que, para él, ésta tiene como elemento objetivo el espacio-tiempo; de ahí el término de “realismo espacio-temporal”, que empleo para la tesis de Einstein. Por lo tanto, la mecánica cuántica no puede tratarse de una teoría realista, que tenga como campo de investigación, estudio y conocimiento el objeto físico⁷⁹. Por su parte, su oponente en esta polémica, reniega del fenomenismo y se declara un físico realista. No obstante, su propia defensa requiere de manera ineludible trasladar el criterio de realidad de una teoría fuera del realismo espacio-temporal: él propone al objeto físico como el *substrato* sobre el que se edifica todo nuestro conocimiento científico sobre el mundo; pero este pronunciamiento sobre el significado extralingüístico de la descripción mecánico-cuántica, sobre el contenido intuitivo de esta teoría y sobre la necesidad del aspecto ontológico no fue suficiente postularlo.

Por este motivo, si se plantea la Polémica como un debate entre fenomenismo y realismo nunca se alcanzará la esencia de la cuestión sobre la que se está discutiendo. Al igual que tampoco se lograría si se parte de los términos, que utilizó Bohr para caracterizarla, entre determinismo e indeterminismo, como ya se ha visto. Por tanto, se ha de buscar, ahora y desde este nuevo prisma, cuál fue la aportación de Bohr al debate con Einstein.

⁷⁹ Dado que su criterio de realidad consiste en que todo aquello que tiene una *existencia real* debe estar *localizado en el espacio* de tal forma que ninguna medición efectuada a cierta distancia pueda alterar en lo más mínimo su estado real físico, esta separabilidad espacial, o física, implica que las diferentes regiones del espacio sean siempre independientes; en función de este principio, los objetos físicos pueden tener una “existencia autónoma”, ya que podemos situarlos en un continuo espacio-temporal, donde los diferentes objetos ocupan diferentes regiones del espacio. Así pues, la separabilidad espacial de cualquier sistema físico, era, precisamente, el requisito para la realidad de los objetos físicos (y también el motivo por el cual las nociones clásicas son *intuitivas*, ya que éstas expresan claramente la “existencia autónoma” de aquéllos, los objetos físicos, en el marco espacio-temporal).

b) El modelo de Bohr de inteligibilidad física: su criterio para el contenido intuitivo

Ya en el primer capítulo dejé establecido que el tipo de conexión entre la teoría y la realidad (contenido intuitivo) viene determinado por el modelo de inteligibilidad que se esté usando en la ciencia de ese momento. Dicha conexión, con los objetos físicos, se realiza a través de los conceptos descriptivos de la teoría, que, si tienen contenido intuitivo, no sólo son predictivos, una vez que han sido matematizados, sino también explicativos y representativos de la realidad.

Éste es el ideal realista de la ciencia moderna, en el que me detuve al principio de este estudio, el cual necesita de la intuición espacial y de la temporal para llevarse a cabo: el tiempo permite matematizar los conceptos físicos y el espacio les aporta su capacidad explicativa. Entonces ya dije que las posibilidades que tienen ambas intuiciones de relacionarse entre sí son diferentes en el modelo de inteligibilidad del marco clásico y en el de Bohr, el cual ofrece otra manera de entender el mundo y la conexión que las teorías físicas establecen con él.

El contenido intuitivo se establece a través de la intuición temporal y de la espacial, que son las responsables del tipo de conexión que la teoría mantiene con el mundo físico, objetivo, porque las características que determinan el estado mecánico de un objeto físico se definen desde las intuiciones espacial y temporal: en aquellas consideraciones anteriores acerca del movimiento quedó claramente establecido que una imagen pictórica, en tanto representación espacio-temporal con realidad física, ha de incluir las categorías espacio-temporales, si no como formas a priori de la representación, sí como dos maneras “objetivas” de ordenar el material sensible. Éste es el elemento en común que mantiene el tipo de representación de la física clásica y el de Einstein, a pesar de las diferencias ya explicadas, y el punto donde se distancia del tipo de representación defendido en el marco de la complementariedad.

En conclusión, la función que ha de cumplir el modelo de inteligibilidad realista es la de tender un “puente” entre el mundo y la teoría, para que la ciencia alcance tal ideal de descripción física (predicción y explicación): como ya apunté en el primer capítulo, tal conexión viene impuesta por el modelo de inteligibilidad que esté vigente y en uso por la teoría imperante de ese momento, de forma que se conecta con la realidad a través de unos determinados conceptos físicos, que a la vez nos la describen y explican, al tiempo que han sido matematizados para que nos sirvan como instrumentos predictivos y de cálculo.

De este modo, tal modelo de inteligibilidad realista exige que los conceptos, con los que se construye una teoría, tengan “contenido físico”. También se usan, para referirse a lo mismo, las expresiones “contenido empírico” o “significado físico”, incluso “contenido intuitivo” porque el camino por el que se alcanza la conexión entre teoría y realidad se recorre a través de los dos tipos de intuiciones, la espacial y la temporal⁸⁰, y quizás fuera este el motivo por el que Heisenberg decidió utilizar el término “Anschaulich” en lugar de “Physik”.

Por tanto, el contenido físico supone un compromiso ontológico del lenguaje de la física, ya que aquél establece una conexión y correspondencia entre los términos de la teoría y los elementos de la realidad. Ya se ha visto cómo el marco conceptual de la física clásica alcanzó este objetivo, postulando la continuidad de las conexiones causales, el representacionismo pictórico del lenguaje científico, la independencia de las propiedades geométricas y dinámicas y, por último, la isomorfía en todos los niveles de la realidad. Pero, en física cuántica este “puente” se ha vuelto quebradizo y no podemos pasar por él sin romperlo; ahora se ha de buscar una nueva vía para mantener el realismo y construir un nuevo puente que se mantenga firme, dentro de la nueva teoría, y que no se derrumbe al intentar cruzarlo.

El criterio que propone Bohr para decidir si una teoría física tiene contenido intuitivo es un postulado epistemológico, en lugar del postulado físico de localidad defendido por Einstein. Dicho criterio consiste en proponer un nuevo modelo de inteligibilidad y de realismo, el cual sustenta su tesis del contenido intuitivo de la física cuántica por analogía con los términos clásicos y de su significado simbólico, a través de propiedades espacio-temporales fenoménicas (y no objetivas): la nueva forma de entender el conocimiento que las teorías físicas nos aportan de la realidad, propuesta desde su filosofía de la complementariedad, se deriva del tipo de contenido intuitivo que éste atribuyó a los términos teóricos de la física, que nos sirven para describir el mundo.

Esta nueva manera de aprehender la realidad y de describirla, a través de una teoría física, sustenta el requisito para aceptar su tesis sobre el contenido intuitivo y la completud de la física cuántica. Sin embargo, como ya he reiterado, implica una “petición de principio”, que no contó con

⁸⁰ La intuición temporal es el instrumento de la predicción, descripción matemática, y la intuición espacial es el instrumento de la explicación en tanto que las causas reales, “físicas”, responsables de cierto fenómeno, han de estar confinadas dentro de un determinado marco espacial.

Einstein como uno de sus adeptos a la nueva doctrina. La cual consiste, esencialmente, en aceptar un nuevo proceso de conceptualización, distinto al ideal descriptivo clásico, de los términos físicos por parte de las teorías.

Es cierto que la descripción, que la física cuántica ofrece del mundo, no responde al ideal clásico de representacionismo pictórico de la realidad por parte del lenguaje, dado que nuestros conceptos no se ajustan del todo a la naturaleza de lo real, revelada por la nueva física; pero, ¿acaso, es este tipo de representación el único posible? El objetivo de Bohr es resolver el problema del contenido físico de la teoría cuántica proponiendo hacer un nuevo uso de los conceptos clásicos, en el cual se haya renunciado a su significado “realista” dentro de un nuevo marco conceptual. Con esto pretende evitar las paradojas que su uso clásico, como representaciones de las propiedades “reales” de los objetos, provoca, ya que, si estas propiedades no son sólo objetuales sino fenoménicas⁸¹, la referencia de estos conceptos no puede ser el objeto en sí mismo, el cual vendría representado espacio-temporalmente por el término lingüístico; ahora, en el marco de la complementariedad, la referencia de los conceptos es *simbólica*⁸², donde no se ignora la inseparabilidad sujeto-objeto, dado que en este tipo de referencia no podemos separar la realidad de nuestra actuación, como meros experimentadores, sobre ella.

De forma que, gracias a este uso simbólico de las nociones clásicas, se evitan las contradicciones conceptuales entre los modelos de onda y partícula, otorgándoles un significado inambiguo dentro de la física cuántica: “Lo único que se debería exigir de estas ideas auxiliares” -Bohr se está refiriendo a la terminología clásica- “en sus aplicaciones es que no sean utilizadas de forma contradictoria y para asegurarse de ello es preciso, sobre todo, tener en cuenta las posibilidades de definición y de observación”⁸³. Estas posibilidades vienen establecidas por las relaciones de indeterminación. Además, con este uso simbólico se establece un puente entre el lenguaje ordinario y el abstracto formalismo matemático, ya

⁸¹ “Propiedades fenoménicas”: en las que se incluye el tipo de dispositivo experimental que se ha usado para medirlas.

⁸² Insisto en que no se refiere a que sea *morfológicamente* simbólica, esto es evidente e inevitable en todo discurso lingüístico, si no a que la referencia de los términos físicos, usados en la descripción de la realidad, ya no es el objeto real independiente si no un símbolo de dicho objeto, de la realidad física, puesto que en nuestra descripción de ella no la podemos desligar del contexto experimental bajo el cual la estudiamos, aprehendemos, comprendemos y nos la representamos.

⁸³ BOHR, N., La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, p. 120.

que nos permite, según Bohr, seguir empleando los términos clásicos en física cuántica por “*analogía*” al uso que de ellos se hacía en el propio marco clásico en el que se desarrollaron como tales y cuya correspondencia con nuestra experiencia perceptiva era inmediata. Así pues, tal y como afirma el principio de correspondencia, podemos beneficiarnos del soporte conceptual de los conceptos clásicos siempre y cuando tengamos presente que su validez ahora no depende de ninguna “representación objetiva” de la realidad, sino de una dependencia asintótica de los conceptos con ésta, y conforme a nuestra experiencia ordinaria, a la que se aproximan pero nunca llegan a “tocar”, es decir, a representar tal cual es mediante propiedades objetivas.

El motivo de tener que recurrir a este uso analógico se debe a que las nociones clásicas son imprescindibles; pero, son imprescindibles porque aluden a nuestra forma de percibir el mundo⁸⁴ y tanto la terminología clásica como nuestra experiencia ordinaria se basan ambas en la representación espacio-temporal. Por ello, Bohr necesita que la complementariedad ofrezca un tipo de modelo espacio-temporal de los fenómenos cuánticos, aunque sea simbólico y sin que aluda a la representación pictórica de imagen visual que estos modelos tenían en el marco clásico: “Sin embargo, esas abstracciones” -las nociones clásicas- “son independientes, como veremos, para expresar el contenido de la experiencia, de forma que se adapte a nuestra representación espacio-temporal ordinaria”⁸⁵. A través de esta otra manera de conceptualizar la realidad, diferente del procedimiento clásico, Bohr piensa que ha conseguido recuperar, parcialmente, los conceptos clásicos y con ellos la posibilidad de la interpretación física, con la que se explican los

⁸⁴ Es decir, porque el lenguaje clásico es el único formado a partir de la experiencia, por medio de la depuración del lenguaje ordinario, lo cual permite que se forme a partir de los objetos y fenómenos empíricos. Por tanto, es el único puente entre aquéllos y cualquier lenguaje formal o matemático con el que expresamos lo que, de hecho, se da en la naturaleza, describiendo la realidad física. Por esta razón, los conceptos clásicos se vinculan a la idea de contenido intuitivo; pero, además, y como ya dije en su momento, hay otros dos motivos, igual de importantes para Bohr, dado que la intuición física la define desde la posibilidad de interpretar el resultado de los experimentos, de comunicar a los demás la información obtenida y de tender un puente entre los objetos microfísicos y los aparatos de medida macroscópicos, que también usa la física cuántica; estas dos razones son: que tales aparatos macroscópicos están contruidos y definidos en términos clásicos y que la física cuántica se verifica mediante experimentos que se formulan también en términos clásicos.

⁸⁵ BOHR, N., La teoría atómica y la descripción de la naturaleza, p. 102.

fenómenos, y no tener que conformarnos únicamente con su descripción matemática (instrumentalismo científico).

Pero, por el camino se ha perdido el modo clásico de concebir la explicación física del mundo: la representación pictórica de los objetos por parte de los conceptos, la objetividad vinculada a una realidad independiente⁸⁶ y, en último término, el determinismo. De tal forma que el problema de la física cuántica reside, precisamente, en el mismo rasgo que le da su grandeza; digámoslo así: *su defecto es su virtud*. Que los fenómenos cuánticos no estén rígidamente unidos a un marco espacio-temporal, los vuelve ininteligibles, según la concepción clásica de la naturaleza, dado que es imposible su representación ostensiva. Sin embargo, esta peculiaridad es capaz de explicarnos los fenómenos radioactivos, el espectro electromagnético, la tabla de los elementos químicos, la estabilidad del átomo, la superconductividad... ¿Acaso, todo esto no es también inteligibilidad, comprensión del mundo, contenido intuitivo? Si la física cuántica es intuitiva, ¿en qué sentido lo es, ya que no representa clásicamente los objetos? ¿Puede este tipo de intuición satisfacer las exigencias de representabilidad e inteligibilidad de las teorías físicas que se erigen a sí mismas como cánones de la realidad? Propondré una respuesta a estos interrogantes en el siguiente y último capítulo.

Dejando, de momento, esta cuestión a un lado, bajo estas circunstancias a Bohr no le quedó otro remedio que entender por “contenido intuitivo” lo siguiente: los conceptos clásicos son intuitivos, tienen contenido físico, como ya dije, porque son capaces de conectar las matemáticas de la teoría con el lenguaje cualitativo de nuestra experiencia ordinaria, con lo cual conseguimos, en primera instancia, *describir físicamente* el fenómeno, es decir, “interpretar” el resultado de nuestros experimentos, en segundo lugar, *comunicar* a los demás la información obtenida y, por último, *tender un puente* entre *el mundo microscópico* que se está estudiando y *los dispositivos experimentales macroscópicos* que para ello se han empleado y que están contruidos y definidos conforme a la terminología clásica, característica de la escala macrocósmica.

En cambio, según Einstein, la condición para que una teoría física tenga contenido intuitivo se recordará que es la siguiente: las propiedades

⁸⁶ Este factor es el que Einstein no perdona: su rechazo a la física cuántica se centra en él, ya que su noción de objetividad como realidad independiente y su concepción de un marco espacio-temporal objetivo en este sentido son, absolutamente, irrenunciables para él; la representabilidad pictórica y el determinismo no permanecen en la doctrina de Einstein tal cual fueron defendidos en el marco clásico.

espacio-temporales son reales y, por tanto, también afirma que se han de poder emplear tanto en las consideraciones estadísticas como en los procesos individuales. Tal condición se encuentra en su teoría del campo único, en la que trabajó durante sus últimos cincuenta años de vida, donde se define la noción de “campo” como un continuo cuatridimensional, cuyas coordenadas espaciales no son rectilíneas ni euclidianas, dado el carácter variable de su curvatura. Pero, entonces, como ya advertí más atrás, el espacio sólo puede ser entendido como un orden de coexistencia de un tipo u otro, que dé cabida a todas las diferentes estructuras topológicas del universo. Por esta razón, Einstein propone un tipo de intuición espacial que no se corresponde con el tipo de visualización de la geometría euclídea, sino que puede dar cabida a cualquier forma de representación espacio-temporal, para poder incluir en ella la espacialidad que implica la geometría de Riemann; pero, entonces, ¿qué tipo de imágenes de los fenómenos físicos puede formarse a partir de los diversos espacios topológicos, que proponen las geometrías no euclídeas? ¿De qué tipo de características espacio-temporales se está hablando? Si los espacios topológicos no son únicamente abstracciones matemáticas, sino que representan estructuras reales de un mundo objetivo, tenemos que la espacialidad de éste se define, y, por lo tanto, también se establece su carácter intuitivo, su contenido físico, a través de una construcción matemática⁸⁷.

En otras palabras, ¿por qué Einstein no cree en la capacidad de la mecánica cuántica para establecer el vínculo conceptual necesario de la teoría con la realidad? La acusación de Einstein acerca de la incompletud de la física cuántica tiene tres capas o niveles. Se recordará que, de la capa más superficial a la más profunda, el orden es el siguiente: I- Es una teoría incompleta porque es de carácter estadístico, regida por leyes indeterministas. II- Su incertidumbre se debe a que no es una teoría clásicamente objetiva, esto es, no puede prescindir del contexto

⁸⁷ A este respecto, Herbert Hörz aporta la siguiente observación: “If abstract spaces are used for the description of physically real relationships resulting from results of measurements, and if certain mathematical objects and relationships turn out to be theoretical predictions for objective processes yet to be discovered, then one can regard this mathematical space as a correct representation of the objectively real structure. In this way, in our understanding, objective space and objective structure are not to be separated from mathematical space. Objective space and objective structure exist before mathematical space, even if they are not yet recognized, but mathematical space is a product of human thought; it demonstrates the creativity of the human mind in conceiving possible relationships which are suited for the representation of physical structures, either known or yet to be found. Einstein has suggested this again and again”. HÖRZ, H., “Philosophical concepts of space and time”. In: FRENCH, A.P., Einstein. A centenary volume, p. 240.

experimental en su representación del objeto. O, dicho de otro modo, no describe los sistemas físicos de una manera autónoma. III- No puede dar una representación “objetiva” y autónoma de la realidad porque carece de contenido físico; es decir, no puede ofrecer una representación espacio-temporal objetiva de la realidad, con modelos geométricos, debido a su incapacidad de inscribir los fenómenos en el espacio-tiempo. Esta circunstancia provoca que el comportamiento de los fenómenos cuánticos, a veces, pueda ser caracterizado por términos tan poco *científicos* como “acciones a distancia” de partículas-fantasmas. ¿De qué otro modo se podría hablar de los fenómenos que violan las leyes del espacio y del tiempo? Si realmente es imposible concebir al espacio de un modo diferente al de su representabilidad como elemento objetivo de la realidad, nos tendremos que acostumbrar a expresiones como aquéllas y a su consiguiente renuncia a la inteligibilidad del mundo.

Sin embargo, Bohr no comparte la opinión de Einstein, piensa que una teoría puede ser *inteligible* y *tener contenido físico* o empírico y, por tanto, *conexión con la realidad*, aunque no la represente a través de modelos espacio-temporales objetivos, “realistas”. Einstein mantiene que las nociones clásicas, en tanto que intuitivas, representan espacio-temporalmente la realidad física; también, para Bohr, la representan, pero insisto en que lo hacen simbólicamente y dentro de tal símbolo se incluyen las propiedades espacio-temporales como fenoménicas, pues sólo así se evitan las paradojas y las ambigüedades que su uso como representaciones de la realidad provocaron a partir de la introducción del cuanto de acción⁸⁸. De ahí que responda a las anteriores objeciones de Einstein afirmando que el carácter estadístico de la física cuántica no supone su incompletud, ya que, al defender el significado objetivo de las relaciones de Heisenberg, ha de aceptar que el indeterminismo es esencial a la naturaleza y es el responsable de que las leyes naturales sean estadísticas. Por otro lado, esta indeterminación también es la responsable de que los términos clásicos (construidos a partir de modelos espacio-temporales) sólo puedan seguir usándose de forma analógica; pero, de esta manera y como ya apunté con

⁸⁸ Es por esta razón por la cual Einstein tergiversó, en algunas ocasiones, las ideas de Bohr, al tiempo que avala mi tesis sobre el verdadero significado de la polémica, en cuya argumentación no puedo detenerme ahora pero que ya he apuntado: Einstein veía a Bohr como un fenomenista porque la cuestión sobre la que debatieron fue el contenido intuitivo de las teorías (su conexión con la realidad), pues, aunque para Bohr la referencia de los conceptos era extralingüística, y por ello afirmo que defendió la objetividad de la ciencia y un cierto realismo, al discutir con Einstein esta cuestión, no pudo salir de los límites trazados por su solución fenomenista al problema de la dualidad.

anterioridad, Bohr piensa que conservan su valor como elementos capaces de conectar el mundo con nuestra capacidad descriptiva: el significado físico y objetivo del indeterminismo es el aval que emplea Bohr para defender el contenido intuitivo de la mecánica cuántica y su carácter descriptivo y realista.

Bohr concede *primacía ontológica* al mundo cuántico: el cual carece de intuiciones, en tanto elementos objetivos de la realidad atómica correspondientes a los elementos subjetivos de la teoría que la describe, y, por lo tanto, no puede ser representado más que de forma simbólica. No obstante, la *primacía gnoseológica* se la lleva el nivel clásico: sus conceptos son los únicos que tienen contenido intuitivo, sólo ellos nos ayudan a representar la realidad cuántica aunque de manera simbólica porque carecen de su característica como elementos objetivos (espacio-tiempo fenoménicos y no reales).

En cuanto a la primacía gnoseológica de los conceptos clásicos, si bien es cierto que Bohr afirma que el lenguaje ordinario posee contenido físico, en cambio, también admite que el formalismo matemático de la teoría cuántica no lo tiene. ¿Por qué? La razón última de esta capacidad, que tienen los conceptos clásicos de “describir” la realidad, está relacionada con nuestra forma de percibir el mundo.

Por un lado, está la cuestión acerca de la representación espacio-temporal, a la que me he referido al hablar de la imprescindibilidad de aquéllos, y, por otro, la hipótesis, que subyace en este lenguaje y que está justificada por nuestra experiencia ordinaria, de poder distinguir con precisión entre el comportamiento de los objetos y los dispositivos experimentales. Hablar de esta distinción es equivalente a hablar de separabilidad entre el objeto observado y el instrumento de medida, de forma que la inseparabilidad de éstos en física cuántica los vuelve “indistinguibles”, tal y como sentencia Bohr a continuación:

“Esta hipótesis” -la de poder distinguir objeto e instrumento- “no sólo está plenamente justificada por nuestra experiencia diaria, sino que constituye la base total de la física clásica, que, precisamente gracias a la teoría de la relatividad, ha alcanzado maravillosa perfección. Sin embargo, tan pronto consideramos fenómenos tales como los procesos atómicos individuales, que por su propia naturaleza quedan esencialmente determinados por la interacción entre los objetos estudiados y los aparatos de medida necesarios para definir las

condiciones de la experiencia, debemos examinar más de cerca qué clase de información es posible obtener así de los objetos”⁸⁹.

La respuesta es que se trata de una información imbuida de ambigüedades y, por tanto, la distinción arbitraria entre el instrumento de medida y el objeto va a alcanzar un protagonismo del que carecía en la física clásica, ya que aquella distinción ha de realizarse teniendo en cuenta que es un mero convencionalismo; pero un convencionalismo muy importante en física cuántica, a la hora de emplear de forma inambigua la terminología clásica, la cual es indispensable. Vuelvo a citar a Bohr:

“Es verdad que el lugar dentro de todo procedimiento de medida donde se hace esta distinción es, ampliamente, en ambos casos, una cuestión de conveniencia. No obstante, mientras que en física clásica la distinción entre el objeto y los aparatos de medida no entraña ninguna diferencia en el carácter de la descripción del fenómeno concerniente, su importancia fundamental en la teoría cuántica, como hemos visto, radica en el uso indispensable de los conceptos clásicos en la interpretación de todas las medidas apropiadas, aun cuando las teorías clásica no ofrecen una explicación suficiente de los nuevos tipos de regularidades con los que tratamos en física atómica. De acuerdo con esta situación no puede haber ninguna interpretación inambigua de los símbolos de la mecánica cuántica a no ser que estén expresados bajo las reglas bien conocidas que permiten predecir los resultados obtenidos a través de un determinado dispositivo experimental descrito de un modo totalmente clásico y los cuales han encontrado su expresión general a través de los teoremas de transformación, ya referidos”⁹⁰.

A pesar de todo lo anterior, Bohr defiende la primacía ontológica de las leyes cuánticas, desde la cual mantiene su compromiso ontológico con el realismo de la física: desde su punto de vista, Bohr sostiene que la física cuántica es algo más que una teoría superficial y describe físicamente

⁸⁹ BOHR, N., *Física atómica y conocimiento humano*, p. 32.

⁹⁰ *Respuesta de Bohr*, p. 234. Y continúa diciendo: “By securing its proper correspondence with the classical theory, these theorems exclude in particular any imaginable inconsistency in the quantum-mechanical description, connected with a change of the place where the discrimination is made between object and measuring agencies. In fact it is an obvious consequence of the above argumentation that in each experimental arrangement and measuring procedure we have only a free choice of this place within a region where the quantum-mechanical description of the process concerned is effectively equivalent with the classical description”.

y con objetividad, “realmente”, el mundo de los fenómenos físicos, sus “estados físicos”, ya que no son independientes del contexto experimental; pues, dentro de la teoría cuántica, los “estados reales”, entendidos como los define Einstein, objetivamente independientes, no existen en la naturaleza; sólo son una idealización clásica.

De esta forma, es una teoría completa porque no podemos ir más allá de aquella unión entre el objeto observado y el dispositivo experimental que se ha preparado y usado para su medición. Éste es el límite absoluto que la Naturaleza impone a la física cuando se adentra en las profundas aguas de lo microscópico, cuya expresión teórica y matemática viene dada por las relaciones de Heisenberg, y a partir del cual debemos construir la interpretación epistemológica adecuada a esta microfísica.

Una interpretación así ha de asumir que su carácter estadístico es algo que pertenece al conocimiento humano y no a la realidad, aunque, dado que Bohr concede un valor objetivo a las relaciones de incertidumbre, el motivo por el cual existen probabilidades gnoseológicas en nuestra teoría es que la realidad está causalmente indeterminada en términos espacio-temporales.

Esta indeterminación implica, lógicamente, que, para seguir usando los términos clásicos, se ha de renunciar a su uso pictórico y objetivo, ya que ni la realidad es autónoma ni los conceptos espacio-temporales pertenecen, exclusivamente, a la realidad como algo independiente del contexto experimental.

Ahora bien, ¿cuál es la manera, requerida por la complementariedad, para combinar las intuiciones, como dos maneras *objetivas* de ordenar el *material sensible*, de forma que sean capaces de conceptualizar la experiencia manteniendo su conexión teórica con la realidad? En el párrafo anterior expuse la forma como ambas se relacionan en el modelo de Einstein; pero el físico danés no dice nada a este respecto.

Einstein fue más allá que Bohr adentrándose un paso más en la naturaleza del problema acerca del realismo y de la física cuántica. No obstante, a pesar de que aquél no lo hiciera, se puede ir más allá de la complementariedad sin contradecirla y, de hecho, se ha de actuar así para contestar a la pregunta de Einstein: «¿Es completa la descripción mecánico-cuántica de la realidad física?».

c) La importancia del contenido intuitivo para el realismo cuántico

¿Por qué es tan importante la cuestión del contenido intuitivo para decidir la completud de una teoría: su valor realista? En el caso de la mecánica cuántica, su completud y su carácter realista se identifican porque aquello que le falta para ser completa es poseer contenido intuitivo, lo cual es también aquello que determina si una teoría tiene elementos objetivos que le otorguen verdad científica y así garantizar su realismo. Éstos son los eslabones de la cadena que configuran la relación de similitud entre el problema de la completud y del realismo.

De este modo, si la objetividad⁹¹, el determinismo y la descripción espacio-temporal se han revelado como idealizaciones, extrapolaciones ilícitas de las leyes acerca de los observables macroscópicos sobre los inobservables cuánticos, y, si no podemos conocer la realidad al margen de nuestra actuación sobre ella, entonces, ¿cómo saber si la física cuántica describe o no la realidad de un mundo exterior? ¿Cómo salir del idealismo de Berkeley, incluso del solipsismo y del subjetivismo, al que parece llevarnos el hecho de carecer de un modelo objetual del mundo?

En el capítulo cuarto ya se advirtió que la física clásica eludía los problemas subjetivistas, evitando el idealismo más puro, porque planteaba su realismo en el ámbito de la objetividad, cuyas raíces se plantaban en el terreno del determinismo: la descripción causal y visual en un marco espacio-temporal, siempre independiente del observador. En física cuántica, una objetividad de este tipo es totalmente impracticable y la única salida, que nos queda, del subjetivismo y del idealismo (solipsista) es defender el realismo demostrando la conexión de los términos de las teorías físicas con la realidad extralingüística, a través del significado de sus conceptos. Por esto afirma Reichenbach que la solución se ha de buscar en

⁹¹ La objetividad clásica se nos revelaría como una idealización, que no puede mantenerse en el nivel atómico, porque, “todo conocimiento comienza con la observación” y sólo podemos hacer física de los “observables”; estos observables se producen cuando interferimos con nuestros instrumentos de medida, una interferencia, cuyo valor (numérico) no es despreciable ni infinitamente reducible debido a que h introduce un límite a la divisibilidad de la interacción observacional. Más allá de los límites del cuanto de acción, no podemos ir y esto significa que no podemos conocer la realidad al margen de nuestra actuación sobre ella. Es más, ahora la física tiene motivos, bien fundados (tanto en la teoría como en los resultados experimentales) para considerar la objetividad clásica como una extrapolación ilícita de las leyes sobre observables en el nivel de los inobservables: es la “realidad velada” del mundo clásicamente objetivo, de los llamados “interfenómenos”, una “realidad transfenómica” o, si se quiere emplear el término acuñado por Zubiri, una “realidad allende”.

la “teoría del conocimiento”, reflexionando sobre cómo conocemos el mundo a través de una teoría⁹². En realidad, se trata del antiguo problema filosófico de la conexión mente-cuerpo, que la filosofía analítica trasladó al ámbito del lenguaje.

La descripción objetiva de la física tradicional combatía el subjetivismo y el idealismo del mismo modo como lo hace nuestro sentido común: no tenían motivos para pensar que el mundo que observamos fuera diferente del que no observamos, y si los tenían apelaban a la simplicidad lógica del lenguaje y de las teorías, apoyándose en que tal supuesto no introducía ninguna contradicción: era el postulado del isomorfismo físico entre el macrocosmos y el microcosmos. Explicaban lo que no era observable a través de lo que sí se podía observar, suponiendo que las leyes eran las mismas; pero, ahora, existen leyes diferentes para explicar la misma realidad, ya que, aunque a niveles distintos, la física cuántica y la física clásica son descripciones de lo mismo: de la materia y la radiación.

La física cuántica echó abajo tal postulado y el modelo atómico ya no “explica” la materia: los constituyentes elementales de ésta y el compuesto que ellos conforman, la sustancia material, no tienen el mismo comportamiento y, entonces, nos preguntamos ¿son “objetos” en el mismo sentido o son diferentes? ¿Es la discontinuidad del mundo atómico capaz de explicar la continuidad del nivel macroscópico? ¿Cómo se puede construir un puente entre ambas realidades y recuperar la objetividad, o mejor dicho, el “realismo” de la descripción física?

Bohr, Heisenberg y de Broglie afirman que se puede explicar la continuidad desde la discontinuidad como una mera “apariencia estadística”. Con esto ganaríamos varias cosas: primeramente, podría darse una explicación del problema de la trayectoria continua de un electrón en una cámara de niebla y con ella, de la cuestión general del movimiento y del comportamiento de los fenómenos a nuestra escala; pero, además, podríamos plantear que la objetividad, el determinismo e incluso la visualización de los fenómenos físicos son sólo “idealizaciones” permitidas en un mundo, el del nivel humano, donde el valor tan pequeño de h puede despreciarse frente a los macro-valores característicos de nuestra escala.

⁹² Reichenbach defiende que sólo el análisis filosófico de la física puede solucionar el problema (del contenido intuitivo y de la descripción espacio-temporal, que el sitúa en el carácter cuántico) de la dualidad onda-corpúsculo, ya que no se puede decidir experimentalmente, dada la naturaleza de la física cuántica y, en concreto, del principio de indeterminación. Cf. REICHENBACH, H., La filosofía científica, pp. 185-199.

Con esta propuesta se consigue homogeneizar la naturaleza del mundo físico, evitando el problema de tener dos niveles distintos de realidad, gobernados por diferentes leyes. Pero, esto nos acerca, de nuevo, a la cuestión inicial: si la física no describe una *realidad allende*, cómo salir del subjetivismo, del idealismo o del voluntarismo científico sin el postulado de la objetividad. ¿Cómo saber si la física describe o no la realidad de un mundo exterior? En otras palabras, ¿cómo saber si las teorías físicas tienen conexión con el mundo real? Las teorías físicas son construcciones, creaciones del intelecto humano; pero ¿son sólo eso? ¿no contienen, además, *elementos objetivos*?

Bohr, Heisenberg y, sobre todo, Einstein, al igual que la mayoría de los físicos, afirman que una teoría tiene contenido intuitivo (o físico) cuando “describe físicamente” la realidad y esta expresión se puede entender de forma general en este sentido: cuando son *algo más* que instrumentos matemáticos de predicción y cálculo. Esta afirmación puede entenderse así: una teoría es realista cuando contiene elementos objetivos, o más elementos objetivos que otra. Esto es lo que determina su conexión con la realidad externa. El problema está en cómo poder identificar estos elementos objetivos de la teoría desde una postura fenomenista sobre el espacio y el tiempo. Ya que el camino hacia el realismo físico a través de la noción clásica de objetividad se nos ha cerrado definitivamente, ¿acaso, nos queda alguna otra vía que no sea la del contenido físico?

Ahora bien, este problema es el más filosófico de todos los que plantea la física cuántica, ya que su solución se ha de buscar, en último término, en la teoría del conocimiento: ¿conocemos a través de intuiciones? ¿Son sólo intuitivas las nociones clásicas (basadas en el marco espacio-temporal) y por ello imprescindibles? Parece que sólo nos queda un camino para salir del idealismo: la conexión teoría-realidad a través de los conceptos descriptivos de la ciencia.

Ciertamente, Heisenberg desarrolló sus relaciones de incertidumbre para resolver este problema. Sin embargo, Einstein piensa que no se ha solucionado nada porque se ha de recurrir a la tesis de Bohr, sobre el carácter intuitivo de los términos clásicos usados por analogía, para que la propuesta de Heisenberg sea algo más que una respuesta pragmatista; pero, como dicha tesis de Bohr no está justificada, las relaciones de indeterminación, concluye Einstein, no pueden dotar de contenido intuitivo a la teoría cuántica. Éste es el principal motivo por el cual se opone a

conceder un valor realista a dichas relaciones⁹³, con lo cual, la mecánica cuántica sigue sin contenido físico, sin conexión con la realidad que supuestamente describe y, por tanto, se trata de una teoría incompleta.

Einstein obtiene una noción de “intuición” que está conectada con nuestra forma de percibir el mundo, la percepción espacio-temporal, que es el aspecto subjetivo de la descripción física, el elemento relativo al sujeto que percibe, representa y describe la realidad; pero, por otro lado, consigue que la intuición se construya sobre la noción de objetividad clásica y, nuevamente, sobre la percepción espacio-temporal, asignándole, así, al espacio-tiempo la característica de elemento objetivo, relativo al objeto físico real e independiente del sujeto empírico.

Sin embargo, en palabras de Bohr, “la interacción inevitable entre objetos e instrumentos de medida fija un límite absoluto a nuestra posibilidad de hablar de un comportamiento de los objetos atómicos independiente de los medios de observación”⁹⁴ y, por otro lado, también limita las posibilidades de obtener una representación espacio-temporal, conforme a las relaciones de Heisenberg. Por tanto, ambos requisitos de nuestra forma de experimentar el mundo, que en física clásica eran respetados e indiscutiblemente defendidos y justificados, ahora son tan imposibles de llevar a cabo en el plano físico-matemático como necesarios para nuestra comprensión de los fenómenos físicos. Por ello, Bohr piensa que hemos de conformarnos con una *aproximación práctica*, en la que la distinción entre objeto e instrumento se realiza de forma arbitraria y convencional y donde la representación espacio-temporal es simbólica. Pero se trata de una aproximación que Bohr cree justificada, ya que ha construido tras ella toda una filosofía que le sirve de apoyo y de fundamento epistemológico. Ésta es la razón de que el físico danés parta de otro principio diferente al de Einstein, e incluso opuesto; un principio que le permite enmarcar a la física cuántica en otra clase de realismo.

⁹³ Por su parte, Bohr pensaba que aquél se oponía a otorgar un valor objetivo al principio de Heisenberg a causa del indeterminismo que introducía en la capacidad de predicción de la física. Esto sólo es verdad parcialmente, ya que Einstein veía el problema del indeterminismo como uno de los inconvenientes de la nueva teoría sobre el mundo atómico, pero tal circunstancia no fue el blanco directo de sus ataques; en realidad, el indeterminismo físico sólo era un problema secundario y derivado de la cuestión fundamental: la conexión de la teoría con la realidad, el contenido físico o *intuitivo* de los conceptos teóricos.

⁹⁴ BOHR, N., Física atómica y conocimiento humano, p. 31.

En definitiva, hay dos métodos para garantizar que una teoría tenga conexión con la realidad, contenido intuitivo, entonces cuál de ellos es el adecuado: “¿el realismo espacio-temporal de Einstein o el fenomenismo espacio-temporal de Bohr (simbolismo conceptual)?”. Más atrás dije que la polémica sobre el valor físico o epistemológico de la inseparabilidad cuántica de los sistemas interrelacionados y del envío de señales superlumínicas entre ellos plantea problemas con el materialismo del realismo científico, la objetividad clásica y, en consecuencia, con el contenido físico, o intuitivo de las teorías.

La postura de Bohr hacia este problema es fenomenista, ya que considerar la inseparabilidad como problema epistemológico sólo puede hacerse si se defiende el fenomenismo espacio-temporal; pues, si se partiera del realismo de las propiedades espacio-temporales como propiedades objetivas, debería mantenerse como una cuestión física, que, por supuesto, ha de negarse. Es decir, como para Bohr el espacio no es un elemento objetivo, sino una propiedad fenoménica que es el resultado de la unión entre el objeto y el instrumento de medida, el hecho de concebir la inseparabilidad espacial como una cuestión epistemológica le sirvió como un aval más para negar la objetividad del espacio que la complementariedad exige para implantar su validez. Esto es, requiere que las propiedades mecánicas, incluidas las relacionadas con el espacio, sean fenoménicas (no pertenecen a la realidad independiente de la observación, sino sólo al fenómeno). Esta actitud justifica que me refiera a su postura como “fenomenismo espacio-temporal”.

Pero, en tanto que este fenomenismo sólo se refiere a tales propiedades no puede juzgarse como un fenomenismo radical o absoluto, sólo relativo. Hablar de magnitudes espacio-temporales fenoménicas no es hablar del fenomenismo del mundo físico en su totalidad; éste no se reduce únicamente a dichas propiedades. Para Bohr, el carácter fenoménico de éstas es, sólo, *el reflejo del indeterminismo mecanicista* de la realidad física; por ello, insiste tanto en que la complementariedad es una propuesta realista, pero alejada del determinismo, de la objetividad clásica y del representacionismo espacio-temporal. De manera que se hace necesaria una revisión ampliada del concepto de realidad, para que dé cabida al realismo cuántico.

A lo largo de este trabajo, en diferentes ocasiones, he enfocado el rasgo realista de la física cuántica y de la complementariedad a partir de tres elementos del pensamiento de Bohr: *su tesis semántica*, el *compromiso ontológico* que ésta conlleva y el *nuevo modelo de inteligibilidad*, el cual propone para conseguir alcanzar el objetivo de validar su propuesta acerca

del contenido intuitivo de las leyes cuánticas. En ellos baso mi defensa a favor de su realismo.

No obstante, Bohr dejó sin resolver la cuestión fundamental, la cual propongo que sea formulada en estos términos: ¿cómo se ha de articular la relación de la intuición espacial con la temporal en el nuevo modelo de inteligibilidad, adecuado a la mecánica cuántica, para conservar el valor realista de la teoría? El análisis de esta pregunta y de una propedéutica hacia su solución es el objetivo de mi tesis. Es cierto que Bohr da un tratamiento simétrico tanto al espacio como al tiempo: ambos son fenoménicos y únicamente son “formas de intuición *analógicas*”. Sin embargo, mi propuesta en el próximo y último capítulo será separarlos, no como formas de medición física sino como formas de intuición, y dar primacía gnoseológica al tiempo, ya que demostraré que el uso de la intuición temporal permite ofrecer una base ontológica a la tesis de Bohr sobre la analogía de los conceptos con contenido físico.

Pero, antes de esto, “escuchemos” cuál fue el *juicio de la lógica* sobre la completud de la mecánica cuántica y el *veredicto de la experiencia* cuando se le preguntó por el principio de separabilidad de los sistemas, exigiéndole, así, que se pronunciara por una de las dos alternativas: *Einstein o Bohr*. El motivo que me ha llevado a escribir las siguientes páginas es ineludible, ya que siempre es posible preguntarse si no existen otras formas de zanjar la cuestión de la completud o incompletud de la física cuántica. Pues bien, aparte de la que he presentado, y que argumentaré en el último capítulo, que es el análisis filosófico, hay otras dos vías: la que ofrece la lógica-matemática y la vía experimental; en el próximo apartado mostraré que ninguna de ellas ha alcanzado su objetivo.

6.3) El Juicio de la Lógica y de la Experiencia en Suspense

Durante más de veinte años, el teorema de completitud, que John von Neumann propuso en 1932, estuvo fuera de toda duda y esta aceptación general supuso que una teoría de variables ocultas era, lógica y matemáticamente, imposible y que, por tanto, la física cuántica era completa.

Expondré, brevemente, esta otra forma de enfrentarse al problema de Einstein acerca de la completud de la mecánica cuántica; pero, dado que, hoy en día, tal teorema no conserva la integridad con la que vio la luz, y que una demostración matemática sobre la completud de una teoría es irrelevante para el enfoque que he adoptado acerca de la crítica de Einstein,

mi interés por este teorema es, meramente, ilustrativo de la situación en la que, hoy por hoy, se encuentra la física ante este dilema.

Me serviré de él para evidenciar que no existe un veredicto definitivo acerca de la completud de esta teoría, ni por el lado de la lógica-matemática, ni por la vía de la experimentación, como se verá en el correspondiente epígrafe acerca del experimento de Aspect.

a) El teorema de completitud de von Neumann

Entre 1932 y 1952, aproximadamente, perduró entre la comunidad científica la forma desde la que von Neumann planteó la cuestión de la completitud de la física cuántica⁹⁵. Su teorema era matemático y pretendía ser una demostración de la completud de la física cuántica al excluir toda posibilidad lógica, o formal, de explicación causal de sus predicciones estadísticas; es decir, los axiomas del teorema de von Neumann establecen que no es posible añadir nuevos elementos a la física cuántica para completarla causalmente porque tal hecho “es incompatible con ciertos postulados fundamentales de la Mecánica cuántica”⁹⁶.

Una vez que von Neumann expuso el formalismo de esta teoría en el lenguaje axiomático de las matemáticas, del que dedujo sus postulados fundamentales, encontró que el principio de superposición *excluye lógicamente* la posibilidad de “parámetros ocultos” que facilitarían cualquier explicación causal de aquél⁹⁷.

En la página 148 de “Fundamentos matemáticos de la mecánica cuántica”, vuelve a referirse a tales «parámetros ocultos» o «coordenadas ocultas», que se asociarían a la descripción de los elementos determinantes de los estados que establece la función ψ , para “*construir con su ayuda una teoría causal que concuerde con la experiencia y de la que, cuando se parte de ψ como único dato (y se promedie sobre las restantes coordenadas), resulten de nuevo las proposiciones estadísticas de la Mecánica cuántica. (...) El acudir a parámetros ocultos, ha permitido en la*

⁹⁵ Aunque no fue el único. También hubo trabajos como el de Jacques Solomon, donde se probaba la inconsistencia de una teoría de variables ocultas con los principios de la mecánica cuántica, es decir, la imposibilidad lógica de completarla causalmente con este tipo de parámetros. SOLOMON, J., “Sur l’indeterminisme de la mécanique quantique”, *Journal de Physique* **4**, 34-37 (1933).

⁹⁶ Von NEUMANN, J., Fundamentos matemáticos de la mecánica cuántica, p. 3.

⁹⁷ Cf. *Ibid*, pp. 225-233.

*Física clásica reducir al principio causal de la Mecánica más de un comportamiento en apariencia estadístico -un ejemplo típico lo constituye la teoría cinética de los gases-". Sin embargo, continúa von Neumann: "Demostraremos más adelante que la introducción de parámetros ocultos es con seguridad imposible, a menos de alterar en su esencia la teoría actual"*⁹⁸.

Advertiré, antes de ir más allá, que esta alteración en su esencia significa eliminar el principio de superposición, y, con él, el indeterminismo cuántico.

Von Neumann inicia su demostración⁹⁹ partiendo del supuesto de que existen parámetros ocultos. Por lo tanto, el método lógico que va a utilizar es la *reducción al absurdo*: se comienza afirmando aquello que se negará al final por haber llegado a una contradicción formal. Esta prueba la expone en el apartado 4.2, "*Demostración de las fórmulas estadísticas*", y está basada en la noción de "*colectividad sin dispersión*", la cual constituiría una variable oculta pues implica que a las propiedades lineales de los operadores cuánticos se les puede dar un valor definido, y no sólo un valor medio, para ciertos observables, es decir, para ciertos conjuntos de partículas sometidos a medición.

Por este motivo, y a través de una serie de razonamientos, concluye que la existencia de estos parámetros implicaría la existencia de "colectividades sin dispersión", es decir, que a tales parámetros no les afectaría el principio de indeterminación de Heisenberg ni, por tanto, el principio de superposición, pues su estado estaría perfectamente determinado, al margen de cualquier medición. A continuación, expone su teorema en contra de la existencia de aquellas colectividades, el cual se basa en tres axiomas, que, según la formulación de Selleri, en relación con el caso de las partículas de spin $\frac{1}{2}$, son los siguientes:

"Axioma I

⁹⁸ La marca en negrita del texto citado es mía.

⁹⁹ Existen variados estudios sobre los argumentos de este teorema, puede consultarse: SÁNCHEZ RON, J.M., "John von Neumann y los fundamentos matemáticos de la mecánica cuántica", pp. XLI-XLII. (Introducción a: Von NEUMANN, J., Fundamentos matemáticos de la mecánica cuántica, pp. XI-LIX); JAMMER, M., The conceptual development of Quantum Mechanics, pp. 389-392; JAMMER, M., The philosophy of quantum mechanics, pp. 265-278; SELLERI, F., El debate de la teoría cuántica, pp. 68-73. Mi exposición se va a centrar en esta última referencia porque contiene la explicación más sencilla y concisa de la prueba y la refutación del teorema de von Neumann, lo cual se ajusta al objetivo, que me he propuesto, de conseguir la mayor brevedad.

Existe una correspondencia uno a uno entre los observables de spin y las matrices hermíticas 2 x 2.

Axioma 2

Si al observable R le corresponde la matriz R , entonces al observable $f(R)$ le corresponde la $f(R)$.

Axioma 3

Si R y S son observables arbitrarios y a y b números reales, entonces la relación siguiente, que expresa la linealidad de los valores medios, es verdadera:

$$\langle aR + bS \rangle = a\langle R \rangle + b\langle S \rangle^{100}.$$

El *axioma 1* es la base del formalismo cuántico, ya que significa que existe una correspondencia entre los observables y los operadores lineales hermíticos. El *axioma 2* es irrelevante. Pero el postulado de las propiedades lineales para los valores medios es el más interesante, ya que el *axioma 3* impone la dispersión ineludible que se produce con la medición entre los observables, en función de la naturaleza lineal de los operadores hermíticos del formalismo cuántico. Dados estos tres axiomas y, sobre todo, el último, von Neumann llega a la conclusión de que no existen conjuntos libres de dispersión a pesar de haber comenzado el razonamiento postulando su existencia: esta contradicción formal permite sentenciar el absurdo que conlleva afirmar que sí existen.

Sobra decir que esta demostración fue acogida con gran entusiasmo por los defensores de la completud de la mecánica cuántica y extendida por ellos, como fue el caso de Born y Bohr. El primero escribió lo siguiente acerca de von Neumann y su teorema:

“Él sitúa la teoría sobre una base axiomática al deducirla a partir de unos pocos postulados, de carácter muy general y plausible, acerca de las propiedades de los «valores esperados» (medias) y de su representación mediante símbolos matemáticos. El resultado es que el formalismo de la mecánica cuántica queda unívocamente determinado por esos axiomas; en particular, no pueden introducirse parámetros ocultos con cuya ayuda podría transformarse la descripción indeterminista en una determinista. De aquí que si una futura teoría ha de ser determinista, no puede ser una modificación de la presente sino que debe ser esencialmente diferente. Cómo podría hacerse esto sin sacrificar todo un tesoro de resultados

¹⁰⁰ SELLERI, F., El debate de la teoría cuántica, p. 71. Véase también las páginas 73-78.

bien establecidos es algo que dejo a la preocupación de los deterministas”¹⁰¹.

Selleri inicia su crítica, subrayando que el *axioma 3* es la raíz y el asiento fundamental de todo el teorema de von Neumann y, no obstante, según él, es el que falla. En su trabajo, expone un tipo de medición, en la que se encuentra un conjunto libre de dispersión, una “variable oculta”, que falsa el axioma 3. Por lo tanto, concluye que el teorema no es lo suficientemente general, es decir, estos axiomas no son tan generales como von Neumann pensaba porque, aun siendo matemáticamente correcto, el teorema “sólo excluye unos tipos muy especiales y peculiares de teorías de variables ocultas, a saber, aquellas que satisfacen sus axiomas”¹⁰².

De este modo, se puede contradecir el teorema de von Neumann: pueden existir colectividades sin dispersión, variables ocultas, que determinen causalmente el estado del sistema descrito estadísticamente por la función de ondas, y, parafraseando a von Neumann, *sin alterar (físicamente) en su esencia la teoría actual*. En esta línea están las interpretaciones causales, o generalizaciones, de la mecánica cuántica, que encontraron Bohm, en 1952, y de Broglie, unos siete años después¹⁰³, las cuales plantean ciertas situaciones que violan los axiomas del teorema de von Neumann.

En otras palabras, aquello que Selleri está afirmando es que los axiomas de von Neumann no agotan todas las situaciones que puede abarcar el propio formalismo matemático de la teoría cuántica. Por este motivo, piensa que es justificable defender que las teorías de Bohm y de Broglie fueron “capaces de hacer aquello que von Neumann había declarado imposible: hallaron un modelo de variables ocultas que no contradecía las predicciones estadísticas de la mecánica cuántica y que, al mismo tiempo, suministraba un fundamento causal para el comportamiento de los sistemas cuánticos individuales. Pasó algún tiempo antes de que esos resultados fuesen apreciados en lo que merecían, el necesario para comprender que el teorema de von Neumann, aunque correcto matemáticamente, en modo alguno prohibía las generalizaciones

¹⁰¹ BORN, M., *Natural Philosophy of Cause and Chance*, Clarendon, Oxford (1949). Citado por J. S. Bell en: *Lo decible y lo indecible en mecánica cuántica*, p. 222.

¹⁰² SELLERI, F., *El debate de la teoría cuántica*, p. 59.

¹⁰³ La teoría de Bohm, en la que me detendré más adelante, retoma las antiguas ideas de de Broglie, inicialmente descartadas por él mismo pero que recuperó años después, acerca de su tesis de la “onda-piloto”, o también denominada de “la doble solución”.

deterministas de la mecánica cuántica, sencillamente porque uno de sus axiomas no era, en general, razonable desde el punto de vista físico”¹⁰⁴. No obstante, como señala Sánchez Ron, ningún *físico* manifestó ninguna duda hacia este teorema hasta 1952, pero sí lo hicieron los *filósofos* Grete Hermann y Hans Reichenbach.

Reichenbach cuestionó su legitimidad o validez lógica porque, aun en el caso de que no se encontrasen variables ocultas, que falsaran los axiomas de von Neumann, no existen razones lógicas para excluir tal posibilidad, ya que su teorema supone la validez general del indeterminismo cuántico en el tercer axioma¹⁰⁵. De manera que, citando a Reichenbach, “solamente demuestra que la suposición de parámetros ocultos no es compatible con la validez universal de la mecánica cuántica”¹⁰⁶. Si se tiene en cuenta, de nuevo, que dicha validez universal se refiere al principio de superposición, parece que, con esta afirmación, el filósofo alemán lo está poniendo en duda. Sin embargo, a pesar de esta declaración, Reichenbach pensaba que el principio de superposición de la ecuación de ondas era un principio, teórica y empíricamente, bien establecido¹⁰⁷. Por tanto, su crítica sólo se refiere a que no existe la demostración lógica de la completud de la mecánica cuántica, pero la considera completa, o, al menos, bien fundada y respaldada por la experiencia.

La objeción de Hermann es similar, pues, también vio, claramente, que el teorema era circular: no es lógicamente lícito pretender demostrar la completud de la mecánica cuántica cuando se ha supuesto su validez

¹⁰⁴ SELLERI, F., El debate de la teoría cuántica, pp. 58-59.

¹⁰⁵ Tal y como expuse en la crítica de Selleri, quien no asumía ni *creía* en tal carácter universal del axioma.

¹⁰⁶ REICHENBACH, H., Philosophic Foundations of Quantum Mechanics, p. 14, nota 3.

¹⁰⁷ Tal y como lo prueba su siguiente declaración: “Although, as we said, we cannot adduce logical reasons excluding such a further development of physics, and, although some eminent physicists believe in such a possibility, we cannot find much empirical evidence for such an assumption. If a physical principle embracing all known entities has been established, it seems plausible to assume that it holds universally, and that there is no unknown class of physical entities which do not conform to this principle. Such an inductive inference from *all known* entities to *all* entities has always been considered legitimate. The principle of describing all physical situations in terms of ψ -functions is a well-established principle, (...) nothing indicates that the principle of the ψ -function will be abandoned. Since the relation of uncertainty and the limitation of predictability follow directly from the principle of the ψ -function, these theorems must be regarded as being as well founded in their universal claims as all other general theorems of physics”. (*Ibid.*)

universal. Es decir, la demostración parte de los axiomas y éstos suponen que la mecánica cuántica es completa porque sólo contemplan los casos específicos que se dan en esta teoría. Si bien, es natural que hagan esto, pues son los postulados teóricos que constituyen la base fundamental de su formalismo, no tienen, sin embargo, validez como base para demostrar su completud, la cual es utilizada por von Neumann, porque, precisamente, son hipótesis no demostradas lógicamente¹⁰⁸.

Esta objeción es más importante que la planteada por Selleri, ya que éste basa sus argumentos en determinadas consideraciones experimentales de casos particulares que pueden ser falsadas empíricamente en cualquier momento. Sin embargo, las objeciones lógicas o formales de estos filósofos son más sólidas, puesto que atacan y derriban la propia estructura formal del razonamiento puro, que el mismo von Neumann concibió como una fortaleza lógica inexpugnable.

Por esta razón, defiendo la misma conclusión de Reichenbach y Hermann: *no existe la demostración matemática* sobre la completud o completud de la física cuántica, dado que toda demostración de este tipo implica asumir su validez universal, esto es, su carácter de teoría completa. Pues, de lo contrario, para poder demostrar tal cosa, la teoría debería permitir salir de sus propios límites matemáticos, de lo cual podría concluirse que no tiene carácter universal y por lo tanto que no es completa. Es decir, su argumento es lógicamente falso porque contiene dos suposiciones contrarias: por un lado, la hipótesis inicial de la existencia de los conjuntos sin dispersión y, por otro lado, la validez general del principio de superposición, que abarca, incluso, a estos estados libres de dispersión, lo cual ya es formal e internamente contradictorio, pues la propia teoría excluye la existencia de tales estados una vez que se acepta dicho principio de la ecuación de ondas. Así lo explica Sánchez Ron:

“El punto clave resultó ser que una hipótesis según la cual «toda combinación lineal real de dos operadores hermíticos cualesquiera representa un observable y la misma combinación lineal de valores esperados es el valor esperado de la combinación», es cierta para los estados cuánticos, pero no -como supuso von Neumann- para los hipotéticos estados sin dispersión”¹⁰⁹.

¹⁰⁸ Cf. HERMANN, G., Les fondements philosophiques de la mécanique quantique, pp. 82-86.

¹⁰⁹ SÁNCHEZ RON, J.M., “John von Neumann y los fundamentos matemáticos de la mecánica cuántica”, pp. L. (Introducción a: Von NEUMANN, J., Fundamentos matemáticos de la mecánica cuántica, pp. XI-LIX).

En realidad, fue Bell en el año 1966 quien puso esto de manifiesto: la linealidad de los valores medios de los observables es una condición que no se debe exigir a los estados de los microsistemas; ésta es la “premisa concreta del teorema de von Neuman que es inaceptable *a priori* en cualquier teoría realista de variables ocultas” y así lo especifican Galindo y Pascual:

“Recordemos que, en el contexto ordinario de la M.C., los observables se identifican con los operadores autoadjuntos de un espacio de Hilbert complejo separable, y que los estados cuánticos convencionales son simplemente funcionales positivos lineales sobre los observables acotados. Von Neumann requiere, sin más, esto mismo de los microestados, es decir, de los estados libres de dispersión. Y bajo esta hipótesis sigue su teorema”¹¹⁰.

Una vez demostrada la escasa fiabilidad, por no decir ninguna, del teorema de von Neumann y descartada, así, la prueba matemática, a continuación examinaré la posibilidad de si existen *pruebas experimentales* decisivas a favor o en contra de su completud.

b) Las Desigualdades de Bell y el Experimento de Aspect

Entre 1964 y 1966 aparecieron dos trabajos de John Stewart Bell: “On the problem of hidden variables in quantum theory” y “On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox”¹¹¹. En el primero exponía las razones por las que fallaba el teorema de von Neumann y por las que era factible construir un modelo teórico de variables ocultas como el de Bohm¹¹². En el segundo formuló su famoso teorema sobre las “desigualdades de Bell”.

Su formulación matemática es como sigue. Si se introducen ciertos *parámetros ocultos o suplementarios*, llamados λ , cuya *distribución en un conjunto de pares de fotones emitidos* se define en términos estadísticos

¹¹⁰ GALINDO, A./PASCUAL, P., *Mecánica Cuántica*, p. 460.

¹¹¹ Inicialmente publicadas en: *Reviews of Modern Physics*, **38**, 447-452 (1966) y *Physics* **1**, 195-200 (1964), respectivamente. Pero, también, recogidas en: BELL, J.S., *Lo decible y lo indecible en mecánica cuántica*, pp. 25-40 y pp. 40-50.

¹¹² Son aquellas mismas razones que acabo de resumir citando a Sánchez Ron y a Galindo y Pascual.

con una *probabilidad de distribución*, denominada $\rho(\lambda)$, tenemos las dos siguientes condiciones de partida:

$$\begin{aligned} \rho(\lambda) &\geq 0 \\ \int d\lambda \rho(\lambda) &= 1 \end{aligned}$$

A cada par de fotones emitido se le asigna el parámetro λ , dado que a los resultados de las medidas les corresponden las siguientes funciones con dos valores:

Cuando analizamos *I* con orientación **a**: $A(\lambda, \mathbf{a}) = \pm 1$

Cuando analizamos *II* con orientación **b**: $B(\lambda, \mathbf{b}) = \pm 1$

A partir de la función $\rho(\lambda)$, $A(\lambda, \mathbf{a})$ y $B(\lambda, \mathbf{b})$ Bell propone que se puede definir una teoría de parámetros suplementarios, o variables ocultas, ya que aquella expresa las probabilidades de varios resultados de las mediciones. Por ejemplo, explica Aspect¹¹³, si nos fijamos en que la función $\frac{1}{2}[A(\lambda, \mathbf{a})+1]$ asume el valor +1 para el resultado positivo (+) y 0 en el otro caso, y la función $\frac{1}{2}[1-B(\lambda, \mathbf{b})]$ toma el valor +1 para el resultado negativo (-) y el valor 0 en el otro caso, podemos hacer la siguiente anotación:

$$\begin{aligned} P_+(\mathbf{a}) &= \int d\lambda \rho(\lambda) [A(\lambda, \mathbf{a})+1]/2 \\ P_+(\mathbf{a}, \mathbf{b}) &= \int d\lambda \rho(\lambda) [A(\lambda, \mathbf{a})+1][1-B(\lambda, \mathbf{b})]/2 \end{aligned}$$

Lo cual nos ofrece la posibilidad de asignar a la función de correlación una sencilla forma matemática, definida en términos de integral, cuya formulación definitiva queda del siguiente modo:

$$E(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \int d\lambda \rho(\lambda) A(\lambda, \mathbf{a}) B(\lambda, \mathbf{b})$$

La gran importancia que tiene este teorema se debe a que su validez depende de si la naturaleza respeta o no el principio de separabilidad espacial de los sistemas físicos¹¹⁴. Es decir, si la localidad física, o

¹¹³ Cf. ASPECT, A., "Experimental test of Bell's inequalities with correlated photons", pp. 151-152. En: Cuadernos de Ontología, pp. 147-170, basado en su conferencia "Experimental test of Bell's inequalities in Atomic Physics", en *Atomic Physics*, **8**, procedente de Eighth International Conference on Atomic Physics, editado por I. Lindgren, A. Rosen y S. Svanberg en 1982.

¹¹⁴ No puedo detenerme en la explicación de este teorema, pero hay explicaciones detalladas de éste, que van desde las más cualitativamente descriptivas, como la de d'Espagnat, hasta las más formales, como la que ofrece Rae. Cf. D'ESPAGNAT, B., En busca de lo real. La visión de un físico, pp. 42-70 y RAE, A., Física cuántica: ¿Ilusión o realidad?, pp. 58-66. Véase también: SELLERI, F., El debate de la teoría cuántica, pp. 147-166 (cap. 5); BELL, J.S., Lo decible y lo indecible en mecánica cuántica, pp. 197-220 y 267-289;

separabilidad, es una propiedad de la naturaleza, cuyo comportamiento obedece siempre a este postulado, entonces el teorema de Bell también ha de ser respetado por ella. Dicho de otro modo, si se demostrara la validez de este teorema se probaría la inviolabilidad del principio de separabilidad y, con ello, la incompletud de la mecánica cuántica. Así pues, la novedad que introduce en este polémico dilema es que puede convertir el *experimento ideal* de Einstein en un *experimento real*; esto es, el teorema de Bell puede ponerse a prueba experimentalmente, tal y como expondré cuando me refiera al experimento de Aspect.

Por lo tanto, dicho teorema, cuyas desigualdades obedecen a las correlaciones EPR, establece, así, las condiciones formales del postulado de localidad y gracias a él se puede distinguir claramente una teoría de variables ocultas locales del formalismo propiamente cuántico, ya que, al mismo tiempo, proporciona una *herramienta teórica* para decidir *experimentalmente* entre dicho postulado y la física cuántica, tal y como Einstein hubiese querido realizar. Aunque, en la actualidad, el experimento ideal del artículo EPR tenga una nueva formulación, que se la debemos a Bohm¹¹⁵, basada en la polarización de los estados de espín $\frac{1}{2}$:

“Considérese un par de partículas de espín $\frac{1}{2}$ creadas de algún modo en el estado singlete de espín y que se mueven libremente según direcciones opuestas. Pueden hacerse medidas, por ejemplo mediante imanes Stern-Gerlach, de proyecciones escogidas de los espines σ_1 y σ_2 . Si midiendo la proyección $\sigma_1 \cdot \mathbf{a}$, donde \mathbf{a} es algún vector unitario, se obtiene el valor +1, entonces según la mecánica cuántica, la medida de $\sigma_2 \cdot \mathbf{a}$ debe arrojar el valor -1 y viceversa. Ahora hacemos la hipótesis, y ésta parece al menos digna de ser considerada, que si se llevan a cabo dos medidas en lugares muy distantes entre sí la orientación de un imán no afecta al resultado obtenido con el otro. Puesto que podemos predecir el resultado de la medida de cualquier componente de σ_2 , se sigue que el resultado de tal medida ha de estar realmente predeterminado. Como la función de ondas cuántica inicial no

D'ESPAGNAT, B., “Les implications philosophiques du Théoreme de Bell”, en: *Cuadernos de Ontología*, pp. 227-236.

¹¹⁵ La presentó por primera vez en su libro, *Quantum Theory*, Prentice Hall, 1951, pero, también en: BOHM, D./HILEY, B.J., *The Undivided Universe. An ontological interpretation of quantum theory*, pp. 225-229.

determina el resultado de una medida individual, esta predeterminación implica la posibilidad de una especificación del estado más completa”¹¹⁶.

Fue esta formulación la que utilizó Bell para elaborar el teorema en la forma matemática definitiva que he descrito más arriba y donde se afirma que si realizamos un experimento en el que medimos cuatro veces las orientaciones relativas de los polarizadores de un gran número de pares de fotones:

“(…) entonces el número total de pares en los que los dos fotones se registran como positivos en el segundo experimento no puede ser nunca mayor que la suma de los números de los pares doblemente positivos en los otros experimentos, a condición siempre de que los resultados de los experimentos estén determinados por variables ocultas poseídas por los fotones y que el estado de uno cualquiera de los fotones del par no se vea afectado por la disposición del otro aparato (distante)”¹¹⁷.

Esto significa que si los experimentos reales llegan a revelar que «el número total de pares en los que los dos fotones se registran como positivos» *es mayor* «que la suma de los números de los pares doblemente positivos», entonces se ha violado la relación de desigualdad, de tal manera que se ha de admitir una correlación a distancia que no respeta la propiedad de localidad de los sistemas, lo cual implica que la inseparabilidad, o no-localidad, es un hecho esencial de la naturaleza y que la física cuántica es una teoría completa.

Desde esta formulación se llega a la misma conclusión que en la versión original: «... *la mecánica cuántica tiene un aparato conceptual y formal que es en sí mismo incompatible con la existencia de objetos atómicos en el espacio y en el tiempo, a no ser que se admitan acciones a distancia*»¹¹⁸. En esta incompatibilidad de los objetos atómicos con su existencia en el espacio y en el tiempo se encierra el significado de la inseparabilidad cuántica; así lo explica d’Espagnat:

“Por «no-separable» es preciso entender que, si queremos concebir en esta realidad partes localizables en el espacio, entonces, si algunas de

¹¹⁶ BELL, J.S., “Sobre la paradoja de Einstein-Podolsky-Rosen”, Lo decible y lo indecible en mecánica cuántica, p. 42.

¹¹⁷ RAE, A., Física cuántica: ¿Ilusión o realidad?, p. 63.

¹¹⁸ SELLERI, F., El debate de la teoría cuántica, p. 143.

estas partes han interactuado según ciertos modos definidos en un tiempo en el que ellas estaban próximas, continuarán interactuando cualquiera que sea su mutuo alejamiento, y ello por medio de influencias instantáneas.

Está claro que una propiedad de este género hace mucho menos plausible toda hipótesis de inserción de la realidad independiente en el espacio o en el espacio-tiempo¹¹⁹.

Este trabajo de Bell proporcionó la base teórica para que la investigación experimental sometiera a prueba las predicciones de la física cuántica y sus posibles interpretaciones causales, las teorías de variables ocultas o parámetros suplementarios, pues aquél puso de relieve las diferencias empíricas entre ambas. Todos los experimentos llevados a cabo por distintos experimentadores sentenciaron la violación de las desigualdades de Bell¹²⁰.

Entre ellos, el más conocido y aceptado por la comunidad científica, es el que realizó Alain Aspect¹²¹ en el año 1982, cuyos resultados dieron que «el lado izquierdo, en lugar de ser más pequeño que el derecho, es en realidad mayor en una cantidad igual a $0,101N$, siendo N el número total de pares de fotones en cada cuenta. El cálculo cuántico de la misma cantidad (tomando en consideración la eficiencia de los detectores) da el resultado $0,112N$ »¹²². Según estos resultados, «el fotón del lado derecho está en apariencia influido por la colocación del aparato de la izquierda», pero «*en el experimento de Aspect los dos polarizadores están separados unos 10 metros y una señal que viajase a la velocidad de la luz tardaría aproximadamente tres veces ese tiempo en recorrer esa distancia. Ahora bien, es de sobra conocido que ningún objeto físico o señal puede viajar más rápido que la luz, así que la posibilidad de que el fotón reciba mensajes del otro detector debe también ser rechazada*»¹²³.

¹¹⁹ D'ESPAGNAT, B., *En busca de lo real. La visión de un físico*, p. 43.

¹²⁰ Si se está interesado en un análisis detallado de los fundamentos físicos de tal variedad de experimentos, véase: ALVÁREZ-ESTRADA, R.F., “Teorías de variables ocultas y resultados experimentales”. En: SÁNCHEZ DEL RÍO, C. (coordinador), *Física Cuántica*, pp. 1060-1072.

¹²¹ ASPECT, A./GRANGIER, P./ROGER, G., *Phys. Rev. Lett.* **49**, 91-94 (1982). Véase también: ASPECT, A., “Experimental test of Bell's inequalities with correlated photons”, en: *Cuadernos de Ontología*, pp. 147-170, basado en su conferencia “Experimental test of Bell's inequalities in Atomic Physics”, en *Atomic Physics*, **8**.

¹²² RAE, A., *Física cuántica: ¿Ilusión o realidad?*, p. 66.

¹²³ *Ibid*, p. 68.

Esta situación nos lleva a valorar, una vez más, el problema de la completud de la física cuántica: si ésta es una teoría físicamente completa y no sólo matemáticamente, en el sentido que tiene en el argumento de Einstein, tenemos que la inseparabilidad está presente en nuestro conocimiento de la realidad, tal y como Bohr admitió implícitamente en su respuesta al artículo EPR.

No obstante, en otro momento ya expliqué la diferencia entre los puntos de vista de estos dos físicos, en relación con el principio de separabilidad: para Einstein, su violación era una cuestión ontológica, físicamente real, que no podía sostenerse en un contexto realista de la ciencia física porque implicaba la existencia de acciones a distancia, emitidas por señales más rápidas que la luz (en contradicción con su teoría de la relatividad), que, además, no eran producidas por causa física alguna, lo cual le llevaba a concluir su incompletud; pero, para Bohr, sólo se trataba de una cuestión epistemológica, dado que se debía tener en cuenta la presencia del acto de medición en dicha violación y por ello hablaba de una revisión de las nociones de “conocimiento” y de “realidad”, acerca de cómo podemos entender y conocer la naturaleza.

Este experimento nos dice que la teoría cuántica no se rige por la localidad, pero, según la interpretación epistemológica de Bohr, a partir de sus resultados no se puede defender que la inseparabilidad cuántica sea una característica de la realidad física independiente de la observación, sino que se trata de nuestro conocimiento del mundo y, por tanto, se contrapone al argumento einsteiniano que vincula las nociones de separabilidad, realidad física y completud, perdiendo su validez dentro de esta postura. Aún más, si al margen del pensamiento de Bohr le concediéramos realidad física, tampoco podría ayudarnos a decidir sobre la completud de la teoría porque la inseparabilidad está implícita en su formalismo y, por ello, sólo reafirma la *completud matemática*, esto es, su coherencia teórica y su aplicabilidad empírica a todos los fenómenos conocidos que caen bajo su ámbito descriptivo. Esto ya se admitió con los experimentos ideales de Einstein durante la Conferencia Solvay, de modo que no revela nada nuevo en relación con el tema de su *completud física*.

Aun así, tras el experimento de Aspect, se admitió entre los físicos, aunque no de manera unánime¹²⁴, que la naturaleza no respeta el principio

¹²⁴ Algunos físicos han puesto en duda estos experimentos, en concreto me refiero a T.W. Marshal, E. Santos y F. Selleri, quienes basan sus críticas en el hecho de que “Bell’s inequalities could have been absolutely proved to have been violated only if the photon detector had an efficiency close to unity. With the actual rather low efficiencies of these detectors, there seems to be room for assumptions concerning the hidden variables of the

de separabilidad espacial, en el dominio atómico, ya que las propiedades observadas en el experimento implican algún tipo de correlación entre la orientación de uno de los aparatos y el del fotón que está alejado espacialmente de él; de modo que las teorías de variables ocultas no pueden ser “locales”.

Esto es aquello que, realmente, demuestran tales experimentos, basados en el teorema de Bell: éste ha sido violado; pero, no es posible decidir *experimentalmente* la completud de la física cuántica porque todavía es empíricamente factible una interpretación causal de ésta, apelando a la existencia de una estructura física subcuántica con *parámetros ocultos no-locales*, la cual ofrezca una explicación “más profunda” de sus predicciones estadísticas. Es lógicamente lícito suponer este postulado sobre la existencia empírica de tales parámetros, es decir, nada impide plantearlo como *posibilidad lógica*; pero la pregunta que, realmente, interesa es acerca de si tiene *posibilidad real*, tanto en el ámbito teórico como empírico.

No obstante, tal posibilidad real o física ha de apoyarse, tal y como nos enseña la ciencia en su evolución histórica, en algún *indicio físico* presente en nuestros conocimientos actuales, que sea *empírico* o *teórico*. Por un lado, acabo de exponer las razones por las que dicho indicio no puede buscarse a través de la vía experimental, porque aún no se ha encontrado ningún fenómeno que no tenga explicación desde la física cuántica; de modo que no disponemos del contexto experimental necesario para diseñar experimentos cruciales.

Por este motivo, el experimento de Aspect no puede ni falsar ni demostrar la completud de la física actual, ya que el fenómeno de la inseparabilidad espacial entre los sistemas físicos, el cual se pretende poner a prueba en este experimento donde se utiliza el formalismo cuántico, está implícito en el propio formalismo. Esto fue aquello que también le ocurrió, en otro ámbito de la física, al experimento de Michelson-Morley, a diferencia de experimentos como el de Compton que sí tenía un fenómeno, el “efecto fotoeléctrico”, que no se conseguía explicar desde el paradigma clásico, lo cual propició que el resultado del experimento fuera una respuesta concreta a la pregunta, que se le formuló a la naturaleza, acerca de la existencia de los fotones.

apparatus which could still preserve locality in spite of the experimental results”. BOHM, D./HILEY, B.J., The Undivided Universe. An ontological interpretation of quantum theory, pp. 144-145.

Así pues, sólo tienen sentido los experimentos cruciales que busquen descubrir nuevos fenómenos, fuera del campo de aplicación de la teoría cuántica.

Por otro lado, en cuanto al contexto teórico, será necesario buscar los indicios en propuestas teóricas alternativas a la actual, como las que expongo a continuación.

c) Variables ocultas frente a otras interpretaciones no-causales de la física cuántica

Este espacio lo he reservado para hablar de dos tipos muy diferentes de interpretaciones de la física cuántica: las causales y las no-causales. Las primeras son las llamadas “teorías de variables ocultas”, las segundas a veces se conocen como “teorías alternativas propiamente cuánticas”, es decir, que interpretan de diferentes modos el formalismo matemático ya establecido de la física cuántica, sin variar ni añadir ningún elemento teórico.

Ambos tipos persiguen ofrecer una interpretación de la microfísica más satisfactoria que la de Bohr y su marco de la complementariedad. Por problemas de espacio y de tiempo no podré profundizar en ellas en este trabajo¹²⁵; sin embargo, no dejaré pasar la oportunidad de mencionarlas para ubicarlas en el lugar que les corresponde en este debate acerca de si la descripción mecánico-cuántica de la realidad es completa o incompleta.

En relación con las primeras, empezaré distinguiendo dos tipos de *variables ocultas: locales y no-locales*. Todas las posibles teorías de variables ocultas locales han de respetar el siguiente requisito:

“Consideremos dos regiones espaciales R_1 y R_2 . Supongamos que es imposible que una señal luminosa, a velocidad c , se propague partiendo

¹²⁵ Todos los interesados en los pormenores de estas teorías pueden consultar, entre otros, los siguientes trabajos, algunos ya citados: JAMMER, M., *The Philosophy of Quantum Mechanics*, pp. 253-339; GALINDO, A./PASCUAL, P., *Mecánica Cuántica*, Apéndices E y F del vol.II; SÁNCHEZ DEL RÍO, C. (coordinador), *Física Cuántica*, Apéndice G; BELL, J.S., *Lo decible y lo indecible en mecánica cuántica*, artículos 1, 4, 8, 12, 13, 14 y 17; RAE, A., *Física cuántica ¿Ilusión o realidad?*, cap. 3, pp. 47-71, SANTOS, E., “The possibility of an interpretation of quantum mechanics that maintains realism and causality”, en: *Cuadernos de Ontología*, pp. 107-114; FERRERO, M., “The relevance of realism and locality in the construction of physics”, en: *Cuadernos de Ontología*, pp. 115-123; CUSHING, J.T., “Bohmian mechanics and its ontological commitments”, en: *Cuadernos de Ontología*, pp. 125-134.

de algún punto de R_1 en t_1 hasta llegar a algún punto de R_2 en t_2 : diremos que R_1 y R_2 tienen una «separación de género espacial». Imaginemos que los resultados de medidas relativas a los fenómenos F_1 y F_2 , que ocurren, respectivamente, en las regiones R_1 y R_2 (con separación de género espacial) son independientes. Una teoría de variables ocultas, que acepta este último requisito con validez general se suele llamar local, aunque sería más correcto denominarla separable¹²⁶.

A su vez, las teorías de variables ocultas locales pueden apelar a la existencia de *variables internas* o *externas*, usando los ejemplos de Selleri, una especie de dispositivo temporal interno de las partículas pertenecería al primer tipo, y, en relación con el segundo, podríamos pensar en «hipotéticas fluctuaciones del vacío en las pequeñas regiones que rodean a las partículas»¹²⁷. Pero, en general, las teorías de variables ocultas o parámetros suplementarios se pueden caracterizar por pretender ir más allá de la mecánica cuántica y ofrecer más información que ésta acerca de los sistemas microfísicos, cuya definición más precisa es la que proporciona Álvarez-Estrada:

“... todos aquellos modelos para un sistema microscópico basados en las hipótesis siguientes: i) La descripción mecano-cuántica es genuinamente incompleta, ii) es posible especificar el estado de un sistema individual más de lo que la descripción cuántica permite”¹²⁸.

Desde el punto de vista epistemológico, tienen como base el realismo clásico, “según el cual la realidad externa del mundo físico existe por sí misma y tiene propiedades definidas, *sea o no sea observada* (es decir, con o sin aparato de medida)”¹²⁹.

¹²⁶ ALVÁREZ-ESTRADA, R.F., “Teorías de variables ocultas y resultados experimentales”. En: SÁNCHEZ DEL RÍO, C. (coordinador), *Física Cuántica*, pp. 1061-1062.

¹²⁷ SELLERI, F., *El debate de la teoría cuántica*, p. 57. En la misma página, un poco más abajo, aclara por qué son locales: “Ambas son *locales* en el sentido de que, en determinado instante, son independientes de la presencia y comportamiento de pedazos de materia, energía o fluctuaciones del vacío, en ese instante, fuera de la pequeña región que rodea a la partícula considerada”.

¹²⁸ ALVÁREZ-ESTRADA, R.F., “Teorías de variables ocultas y resultados experimentales”. En: SÁNCHEZ DEL RÍO, C. (coordinador), *Física Cuántica*, p. 1061.

¹²⁹ *Ibid.*

Pero, dado el resultado del experimento de Aspect, es muy probable que estas teorías sólo puedan reivindicar la existencia de *variables ocultas no-locales*. En esta línea están teorías como la de Bohm, de Broglie o Vigier, que, esencialmente, parten de aceptar que existen, o bien, acciones a distancia entre los sistemas cuánticos, o bien por otro lado, un substrato material, de un tipo u otro, causalmente responsable de esa interrelación de las partículas, espacialmente separadas.

En el caso de Vigier, este físico apuesta por una teoría materialista y mecanicista de *interacciones colectivas superlumínicas*¹³⁰, con una propiedad interna, que tienen las partículas, de propagar e intercambiar, instantáneamente, señales, en forma de ondas reales “superlumínicas”, a través de un vacío físico, poblado, en realidad, por estos numerosos y diminutos corpúsculos no observados, que actúa como termostato de las partículas rígidas correlacionadas¹³¹.

Sin embargo, esta teoría plantea problemas desde el punto de vista físico que no aparecen en la teoría de Bohm. Según la teoría del *orden implicado*, los sistemas cuánticos, que están espacialmente separados pero que han entrado en interacción, es decir, los sistemas cuánticos correlacionados, representan en el espacio una totalidad interconectada e indivisible, una “totalidad continua”; dos sistemas de este tipo no son, realmente, dos objetos separados, sino la manifestación de una realidad, espacialmente, interconectada en términos de un *todo*, como en el ejemplo del holograma.

Tanto la teoría de Bohm como la de Vigier pretenden completar causalmente el formalismo matemático de la física cuántica, partiendo de la no-localidad de los sistemas físicos y, por tanto, pueden estar de acuerdo con los resultados del experimento de Aspect, pero existen objeciones:

“Debe, sin embargo, llamarse la atención sobre el hecho de que las ideas de Bohm, como las de Vigier, no están todavía en fase de pleno desarrollo; en principio podrían resolver las paradojas pero en la práctica aún no las resuelven. Queda, además, el problema de reconciliar esos efectos no locales con la relatividad”¹³².

¹³⁰ VIGIER, J.P., *Lett. Nuovo Cimento*, vol. **24**, 258, 1979.

¹³¹ Cf. SELLERI, F., *El debate de la teoría cuántica*, p. 143.

¹³² *Ibid*, p. 145. Dicho lo cual, recoge una cita de Dirac, perteneciente al año 1972: “La no-localidad está contra el espíritu de la relatividad, pero por el momento es lo mejor de lo que somos capaces ... y, desde luego, no estamos satisfechos con tal teoría. Creo que lo mejor sería decir que no está resuelto el problema de reconciliar la teoría cuántica y la relatividad”.

Pero, además, he dicho que puede encontrarse, dentro del propio esquema matemático de la física cuántica, otro tipo de interpretaciones que, sin salirse de los principios teóricos y matemáticos de la física cuántica, plantean otras explicaciones no-causales de ésta, equivalentes a la interpretación de Bohr¹³³. Éstas van desde el idealismo positivista de Heisenberg, hasta el idealismo subjetivista de Wigner, pasando por las ideas del físico soviético V. A. Fock acerca de la “relatividad respecto a los medios de observación”¹³⁴, o por la hipótesis de los “muchos mundos” de Everett y De Witt. Estas propuestas se mueven por otras vías distintas a la que siguen las teorías de variables ocultas, las cuales, como se ha de recordar, son interpretaciones causales de la física cuántica, que apelan a la existencia de nuevos parámetros, no contemplados por la actual teoría, y que explicarían causalmente las propiedades probabilísticas del comportamiento de los sistemas cuánticos individuales.

Comenzaré con el primer grupo y, en concreto con el “idealismo cuántico”. La postura, más puramente, idealista, está relacionada con el subjetivismo y fue liderada por el físico Eugene P. Wigner; pero, también, hay otros físicos adeptos a ella, como, por ejemplo, von Neumann¹³⁵, Walter Heitler¹³⁶, Edmond Bauer y Fritz London¹³⁷. Resumiré brevemente la solución que presentan estos pensadores al problema de la medición

¹³³ Este epígrafe sobre otras interpretaciones de la física cuántica podría hacerse exageradamente extenso si incluyera en él las propuestas contemporáneas. Por este motivo he tenido que elegir entre éstas y las interpretaciones más cercanas en el tiempo a la época de Einstein y Bohr y, dado que mi trabajo versa sobre las posturas de ambos físicos, he optado por las últimas.

¹³⁴ FOCK, V.A., *Filosofskie Voprosy Fiziki*, Moscú, 1958. En: Fundamentals of Quantum mechanics, MIR publishers, Moscú, 1978. Bohr estuvo de acuerdo con este trabajo de Fock e incluso le influenció en las cuestiones terminológicas a la hora de redactar sus últimos ensayos. Cf. SELLERI, F., El debate de la teoría cuántica, pp. 103-107.

¹³⁵ Cf. Von NEUMANN, J. Fundamentos matemáticos de la mecánica cuántica, 247-317.

¹³⁶ Cf. HEITLER, W., “The Departure from Classical Thought in Modern Physics”, en: SCHILPP, P.A., Albert Einstein: Philosopher-Scientist, pp. 179-198. Por ejemplo, cuando argumenta en la página 194 acerca de la necesidad de un ser consciente para realizar una medición, concluye afirmando que “... the *observer* appears, as a *necessary* part of the whole structure, and in his full capacity as a conscious being”.

¹³⁷ BAUER, E./LONDON, F., La théorie de l’observation en mécanique quantique, Hermann, París, 1939.

cuántica¹³⁸, cuya expresión teórica es el principio de superposición de la ecuación de Schrödinger y el colapso de ψ , junto con las relaciones de incertidumbre de Heisenberg. Estas explicaciones proponen introducir la conciencia del observador como la causa del colapso de ψ ; es decir, que existe una propiedad común a todas las conciencias que, sólo por el hecho de conocer el resultado de la observación, hace que las posibilidades de la superposición de estados se reduzcan a una sola efectiva. Por este motivo, Wigner afirma: "... es el registro de una impresión en nuestra conciencia lo que altera la función de onda, porque modifica nuestra apreciación de las probabilidades de las distintas impresiones que esperamos recibir en el futuro. Este es el momento en el cual la conciencia entra en la teoría de manera inevitable e inalterable"¹³⁹. Ahora bien, dicho de otro modo:

"... el observador está dotado de una «conciencia», de una «facultad de introspección» que no poseían ni el objeto ni el aparato de medida y que le permite tomar conciencia inmediatamente de su propio estado. Conociendo su «estado», sabrá instantáneamente el estado del aparato y de ahí el del objeto, lo que le autoriza a proceder a la reducción del conjunto de probabilidades. Citando a London y a Bauer, los comentaristas más célebres de von Neumann, «no es una interacción misteriosa entre el aparato de medida y el objeto lo que produce en la medida la aparición de una nueva ψ del sistema. Es únicamente la conciencia de un Yo que se separa de la función ψ antigua y constituye una nueva objetividad en función de su observación consciente, atribuyendo al objeto a partir de ese momento una nueva función de onda»¹⁴⁰.

En realidad, fue von Neumann el precursor de esta idea, pues no le quedó otra alternativa que introducir la conciencia del observador durante el colapso de la función de ondas porque:

"... al entender que el aparato de medida debía obedecer también a las leyes cuánticas, se veía conducido a un círculo vicioso del que podía salir gracias a un planteamiento basado en unas condiciones

¹³⁸ En WHEELER, J.A./ZUREK, W.H. (eds.), Quantum theory and measurement, se incluyen artículos de Wigner, London y Bauer, así como, también, de Everett.

¹³⁹ WIGNER, E.P., "Remarks on the mind-body question", p. 289, publicado en: GOOD, I.J.(ed.), The scientist speculates, Heinemann, Londres, 1961. (Citado por Selleri en: El debate de la teoría cuántica).

¹⁴⁰ ANDRADE e SILVA, J. / LOCHAK, G., Los cuantos, p. 182.

experimentales extremadamente idealizadas y en el reconocimiento que siempre se llega a una situación en la que la mente del observador (clásico) hace las veces de un operador (cuántico) con el que en mecánica cuántica se obtienen resultados de medidas. En cierto sentido, además, el procedimiento de von Neumann es consistente con su enfoque matemático-axiomático (la mente del observador generaliza, «abstrae», la situación en que tiene lugar la medida). Desde el punto de vista de von Neumann la reducción (o colapso) de la función de ondas era una necesidad para completar la estructura formal y conceptual de la mecánica cuántica. En este sentido, se puede decir que completó las ecuaciones básicas de la mecánica cuántica con el postulado del colapso de la función de ondas, del que habían estado cerca algunos de sus colegas, utilizándolo incluso de manera implícita, pero del que todavía les separaba una cierta distancia conceptual¹⁴¹.

Este idealismo atribuye a la conciencia del observador un papel privilegiado en la construcción de la realidad, llegando a afirmar que el mundo exterior, la realidad física, no existe si no es observada. Tal doctrina conduce a posturas espiritualistas y místicas, donde se afirma que la mente tiene la capacidad de alterar el mundo objetivo, sin que medie ningún elemento material; se concede prioridad física y lógica a la mente sobre la materia, la existencia de la cual, cuando no es abolida y negada, está subordinada a la del pensamiento, pues el espíritu existe independiente de la materia y es el que rige el mundo: la sustancia del mundo es espiritual. Es innecesario, por su evidencia, resaltar que este idealismo-subjetivista cuántico bebe directamente de las fuentes del idealismo de Berkeley o de Hegel.

Ahora bien, aquellos que defienden esta postura se aferran, en gran parte, al hecho de que el colapso de la función de estado sólo se produce durante una medición y mientras que el resto de las interacciones, que no son la observacional, no producen este efecto, sino que va aumentando su complejidad sin decantarse por ninguna de las posibilidades que contiene. Por tanto, alegan la necesidad de observar para que el mundo tome una forma determinada. Sin embargo, esto es una interpretación errónea de lo que le ocurre a Ψ , pues, de hecho, no aumenta su complejidad; esto es sólo lo que *parece* cuando en realidad lo que *sucede* es que se dilata. Por esta razón las interacciones físicas, que no sean producidas por la medición, no

¹⁴¹ SÁNCHEZ RON, J.M., “John von Neumann y los fundamentos matemáticos de la mecánica cuántica”, p. LIV, (Introducción a: Von NEUMANN, J., Fundamentos matemáticos de la mecánica cuántica, pp. XI-LIX).

aumenta el número de estados posibles que contiene la ecuación de Schrödinger y lo único que hace distinta a la interacción observacional del resto de aquéllas es que determinan uno de los estados mecánicos posibles. Lo cual sólo significa que la realidad física no está determinada en dichos estados, pero tal indeterminación, si es considerada objetiva, no implica la inexistencia del mundo ni de la materia.

Contra este tipo de idealismo se levantaron las tesis, propiamente, realistas, a veces denominadas “materialistas”, pero también lo hicieron desde el positivismo, que, en el ámbito cuántico se convierte en otra variante del idealismo. Entre los que sostienen esta interpretación de la física cuántica están Werner Heisenberg, Mario Bunge o Karl R. Popper. Cuando Heisenberg se apartó de la influencia de Bohr, desarrolló un tipo de idealismo positivista, donde se proponía al físico conformarse con el esquema matemático y el resultado de las observaciones experimentales, ya que, para él el principio de indeterminación implicaba que las cantidades envueltas en tales relaciones no tienen ningún sentido físico al margen de su valor métrico (numérico medido).

Desde este punto de vista, el problema que se plantea el físico “materialista” cuando se pregunta qué le ha ocurrido exactamente a la realidad, es un problema sin sentido, ya que lo único que podemos conocer son nuestras observaciones y, dado que es nuestro conocimiento aquello que es descrito por la función de onda, es normal que ésta se colapse cuando realizamos una medición, puesto que hemos modificado nuestro conocimiento de la realidad. Heisenberg toma de la “inseparabilidad sujeto-objeto” sólo su aspecto fenomenista, sin contar con el rasgo realista que Bohr le atribuyó desde su doctrina del “actor-espectador”. Sin embargo, en esta interpretación del proceso observacional, aun siendo idealista, no entra en juego la conciencia del observador, éste es sólo un sujeto físico, que realiza una observación, usando aparatos de medida¹⁴².

Pasaré, ahora, a otro tipo de interpretaciones del problema de la medida. Son interpretaciones “realistas”, “materialistas” u “objetivas”, donde el papel esencial atribuido a la mente del observador o al acto de

¹⁴² “El experimentador no crea las cosas con solo imaginarlas, sino que manipula y modifica cosas en sí con la ayuda de teorías que no incluyen referencia alguna a sus propios estados mentales”. BUNGE, M., Racionalidad y Realismo, Madrid, Alianza Editorial, 1985, p. 158. Popper también se opone a la interpretación subjetivista (ver, por ejemplo, POPPER, K.R., “La objetividad de la teoría cuántica”, pp. 138-160, en: Teoría cuántica y el cisma en Física); sin embargo, su alambicado idealismo es expuesto en: POPPER, K.R./ ECCLES, J.C., El yo y su cerebro, (Barcelona, editorial Labor, 1980) y comentado por Alastair Rae en su libro Física cuántica. ¿Ilusión o realidad, pp. 93-95.

medición se sustituye por otros elementos como pueden ser la existencia de un “universo ramificado” o de “atajos en el tiempo”; aquí se cuestionan la unicidad del universo y la unidireccionalidad del tiempo, respectivamente, en lugar de la objetividad de la ciencia y la superposición de estados.

La primera hipótesis, basada en el concepto de “pluralidad de mundos”, fue propuesta por el físico norteamericano Hugh Everett¹⁴³, en 1957, quien tuvo el apoyo de John Wheeler, y que desarrollaron en 1970 los compatriotas de Everett: Neil Graham y Bryce De Witt¹⁴⁴. En esta teoría no existe el colapso de la función de onda, pues en lugar de interpretarse como la reducción a una posibilidad, se entiende como la división constante de sí misma, produciendo múltiples ramas del universo, que no pueden entrar en contacto y que están representadas por una sola función de onda de creciente complejidad y que se escinde sin cesar, haciendo del universo un sistema global que se está bifurcando continuamente¹⁴⁵:

“El modelo de Everett se distingue de la interpretación de Copenhague por su representación de la medición científica. En la imagen de la pluralidad de mundos, toda medida que se realiza de cierta cantidad obliga al observador a que seleccione una de las ramas alternativas del universo. Algunas partes de la función ondulatoria siguen existiendo en otro mundo, pero el observador ya no puede acceder a ellas. Mediante el proceso de selección, el observador emprende su viaje de forma irreversible por uno de los múltiples caminos del tiempo. Una realidad determinada se elige entre todos los posibles destinos del universo. Además, numerosas copias del observador emprenden su viaje por otros caminos del tiempo. Cada observador sigue inconscientemente de la existencia de los demás”¹⁴⁶.

Es interesante resaltar que las matemáticas sobre las que se construye esta teoría son muy sólidas, como ocurre con casi todas las

¹⁴³ EVERETT III, H., *Rev. Mod. Phys.* **38**, 453 (1957).

¹⁴⁴ DE WITT, B., “Quantum Mechanics and Physical Reality”, *Physics Today*, vol. 23, pág. 4 (1970).

¹⁴⁵ Esta teoría no sólo ofrece una explicación del problema de la medida sino también del experimento de la doble rendija y de la inseparabilidad cuántica de los sistemas físicos.

¹⁴⁶ HALPERN, P., El tiempo imperfecto. En busca del destino y significado del cosmos, p. 155. Sobre este tema hay muchas referencias, por ejemplo: RAE, A., Física cuántica. ¿Ilusión o realidad?, pp. 105-115; también se puede consultar: DAVIES, P. / GRIBBIN, J., Los mitos de la materia, pp. 191-195.

alternativas que he venido mencionando, sin embargo, a pesar del interés que ésta suscitó en la década de los setenta, en la actualidad ya nadie trabaja en ella. La razón de esto, de acuerdo con Ortolí y Pharabod, es que tiene superabundancia de elementos, en este caso de “universos”¹⁴⁷.

Por último, expondré una hipótesis más, que también se postula, como las otras, dentro de la física cuántica propiamente dicha, es decir, sin incluir nuevas variables desconocidas, esta vez para conservar la localidad espacial, pero a costa de sacrificar nuestra concepción ordinaria de tiempo¹⁴⁸. Es la hipótesis de la “reversibilidad cuántica del tiempo”; en ella se intenta explicar el fenómeno de la no-separabilidad, en el que las partículas parecen capaces de comunicarse a distancia, en función de la idea de que éstas pueden retroceder y avanzar en el tiempo, esto es, pueden viajar a través de él. El físico francés O. Costa de Beauregard y los norteamericanos Cramer y Davidon proponen que el tiempo puede ser recorrido en los dos sentidos, de forma que esta reversibilidad temporal permite la posibilidad de avanzar y retroceder en el tiempo. Con esta idea pretendieron dar una explicación de los resultados de la experiencia de Aspect que, en palabras de Ortolí y Pharabod, consiste en lo siguiente:

“... lo que llamamos un cuanton (un fotón, por ejemplo) está formado por la combinación de una onda “retrasada” que recorre el tiempo en el sentido habitual y de una onda “avanzada” que se remonta en el curso del tiempo. En la experiencia de Aspect, los dos fotones son emitidos por la fuente en forma de ondas retrasadas en un tiempo que nosotros consideramos el origen y por lo tanto el tiempo $t=0$. El fotón 1 llega al aparato de medición 1 en el tiempo t_1 , de modo que su polarización queda fijada; el aparato 1 emite entonces una onda avanzada que remonta el curso del tiempo para encontrar en el tiempo 0 el fotón 2 en la fuente; la onda puede en ese momento comunicar al fotón 2 la polarización que éste debe tener para que las leyes cuánticas se verifiquen. El esquema funciona igualmente bien si se considera que el fotón 2 fue objeto de medición en primer lugar”¹⁴⁹.

Esta tesis sobre la interpretación de la “acausalidad” o “acción a distancia” encontró apoyo en los diagramas del físico norteamericano

¹⁴⁷ Cf. ORTOLÍ, S. / PHARABOD, J.P., El cántico de la cuántica. ¿Existe el mundo?, cap.7.

¹⁴⁸ *Ibid*, pp. 99-100.

¹⁴⁹ *Ibid*, p. 103.

Richard Feynman¹⁵⁰, que fueron propuestos por él en el año 1949 como el método más sencillo para calcular las *matrices de difusión*¹⁵¹. Según un ejemplo del propio Feynman, cuando un electrón penetra de pronto en una zona restringida del espacio donde impera un fuerte campo electromagnético, al salir de esta región, sale con su trayectoria modificada. El punto *A* es aquél dentro de la región del campo electromagnético donde comienza a producirse el cambio de dirección, y el punto *B* donde culmina este cambio, poco antes de salir del campo. La explicación de este fenómeno es la siguiente:

“... en *B* se crea un segundo electrón que sale de la caja y se crea un positrón (electrón positivo) que se dirige a *A* donde habrá de aniquilarse con el primer electrón. Pero el cálculo de esta contribución, para que dé buen resultado, debe hacerse con la siguiente interpretación: el primer electrón llega a *A* en el tiempo t_2 , "luego" se remonta en el tiempo hasta el punto *B* al que llega en el tiempo t_1 , más pequeño que t_2 , y por fin sale de la caja. ¡El positrón está asimilado a un electrón que remonta el curso del tiempo!”¹⁵².

Según esta interpretación de la física cuántica, parece que las partículas “prefieran” una determinada dirección, la cual acaban siempre por restablecer, pues, cuando una partícula “remonta” el curso del tiempo, a su encuentro sale su antipartícula que rectifica el sentido de la flecha hacia “adelante”, restableciendo la dirección del tiempo que la partícula había cambiado.

Pues bien, una vez esbozadas estas teorías, la conclusión que pretendo sostener es que todas estas propuestas teóricas, no sólo las interpretaciones propiamente cuánticas sino también las teorías de variables ocultas no-locales, *carecen de indicios teóricos*, fuera del contexto físico del formalismo cuántico. Las primeras de ellas son, únicamente, alternativas epistemológicas, que nada nuevo aportan al actual esquema teórico y matemático. En cuanto a las segundas, tampoco lo consiguen,

¹⁵⁰ Estos diagramas son analizados, detalladamente, en GRIBBIN, J., En busca del gato de Schrödinger, pp. 161-167.

¹⁵¹ Dichas matrices “permiten prever las probabilidades de que un sistema de partículas (cuantones) pase a un segundo sistema de partículas, cuando las partículas del primer sistema entran en colisión o sufren una perturbación debida a un campo de fuerzas”. ORTOLI, S. / PHARABOD, J.P., El cántico de la cuántica. ¿Existe el mundo?, p. 104.

¹⁵² *Ibid*, p. 106.

aunque a diferencia de las otras sí que lo persiguen, pero desde una perspectiva equivocada: es inútil, si aceptan la no-localidad, encontrar algún indicio teórico a favor de la incompletud de la física cuántica, ya que tal característica es propiamente cuántica.

Es decir, es el propio valor constante del cuanto de acción el elemento teórico que establece que los sistemas microfísicos no respeten el postulado de localidad, dado que es el responsable de la dualidad corpuscular-ondulatoria y de su vinculación con las propiedades dinámicas y cinemáticas, lo cual convierte a la naturaleza en una realidad físicamente indeterminada y mecánicamente interconectada o correlacionada: las magnitudes mecánicas que definen y determinan el estado y la evolución de los microsistemas están íntimamente *unidas*, esto es, *internamente relacionadas* entre sí por el cuanto de acción, que al tener el carácter de constante obliga a dichas propiedades que ajusten sus valores en función de la medición de una de ellas para no sobrepasar el límite impuesto por la constante de Planck.

En consecuencia, la *posibilidad real* o fáctica, y no sólo lógica, de conseguir hacer efectivas tales especulaciones teóricas se desvanece en el horizonte de la física; aún más, por ello, no es extraño que dichas hipótesis no sean predictivas, ya que carecen de evidencias teóricas que puedan ser corroboradas por la experimentación. Con esto, se pierde la última esperanza de buscar en la experiencia y en la lógica un juicio justo sobre la completud de la física cuántica: de momento su veredicto queda en suspenso. Así pues, sólo queda el análisis filosófico para decidir entre las posturas de Bohr y Einstein: la física cuántica podría ser una teoría completa si cumpliera el requisito realista, planteado por el creador de la relatividad, de poseer contenido intuitivo; es decir, alguna conexión con la realidad exterior; algo que justifique su adecuación con ella.

d) Conclusión. El ocaso de la representación pictórica como ideal realista de descripción física

Cuando Einstein y Bohr debaten acerca de si la física cuántica es completa o no, aquello que se están preguntando es si una teoría como ésta es capaz de describir la realidad, es decir, si existe una correlación, o conexión, entre la teoría y el mundo, que ella describe.

En otras circunstancias podría identificarse este debate con una polémica entre realismo y fenomenismo; pero, tal y como es el marco de la complementariedad, esto no sería justo para Bohr. De cualquier forma, en

el primer apartado del capítulo V, seguí la línea que traza el planteamiento de Einstein entre realismo y fenomenismo, hasta concluir que el camino era equivocado.

También se podría caracterizar como una discusión entre determinismo e indeterminismo; pero, esto tampoco sería justo, en esta ocasión para Einstein, ya que su realismo se apoya en otras consideraciones, además del determinismo, respecto a las cuales, ciertamente, éste está interconectado. No obstante, en otro momento, también desarrollé esta opción con la finalidad de demostrar que tampoco hay conexión entre los razonamientos de ambos si se sigue esta línea.

Incluso, hasta la tercera década del siglo XX, se hubiese podido afirmar que esta polémica plantea el problema de la objetividad de la ciencia, enfrentando el materialismo al idealismo; es decir, ¿existen en nuestras teorías, que son construcciones humanas, *elementos objetivos*, pertenecientes a la realidad externa, al mundo físico? Quien entienda la postura de Bohr identificándola con el idealismo de Berkeley, o con cualquier otro fenomenismo o positivismo, tendrá que sostener que el físico danés contestaría que no. Sin embargo, Bohr hubiese podido responder afirmativamente, siempre y cuando, le ofrecieran la oportunidad de matizar la pregunta, ya que esta formulación, sí tendría sentido para Einstein, pero se ha de tener en cuenta que, para Bohr, sería una pregunta llena de ambigüedad, puesto que él definió la objetividad desde el lenguaje y no a partir de la realidad en sí misma.

Ciertamente, el problema de la objetividad de la ciencia es, en realidad, el problema principal que subyace en la Polémica; pero, dado que Bohr introduce su “doctrina del actor-espectador”, no puede plantearse en los términos clásicos con los que Einstein aborda la cuestión, ya que tal concepción desmerecería la contribución de Bohr a la epistemología, al ignorar los nuevos elementos, que la filosofía de la complementariedad introduce en este debate.

Por lo tanto, para poder sacar algo de provecho de estas discusiones, se ha de actualizar el problema y plantearlo desde la posibilidad que tienen las teorías físicas de representar el mundo (objetivo): la realidad extralingüística. Es decir, el tema central de la Polémica es la discusión entre dos tipos distintos de realismo.

Es en este sentido en el que, tanto Bohr como Einstein, se preguntan si la descripción mecánico-cuántica de la realidad es completa o incompleta; en otras palabras, si su descripción de la realidad contiene *elementos objetivos*, con capacidad para representar el mundo físico.

Por ello, cuando me refiero a los “elementos objetivos” de una teoría no estoy hablando de los objetos en sí mismos, sino de aquellos elementos teóricos que tienen una conexión con la realidad, conexión del tipo que sea; Einstein, aunque defiende un tipo de conexión diferente a la de Bohr, también estaría de acuerdo con esta aclaración. Es evidente que esta forma de entender los “elementos objetivos” de una teoría hace que puedan ser identificados con la noción de “contenido intuitivo” o “sentido físico”.

Éste es el punto en común que propongo para enlazar los dos contextos epistemológicos tan diferentes en los que se desarrollan las argumentaciones de Bohr y Einstein y, aunque soy consciente de haber forzado el discurso de Einstein, incluso puede que también el de Bohr, la finalidad con la que he perseguido esta meta quizás justifique el haber paseado la Polémica por el terreno fronterizo, y siempre pantanoso, de lo que estos físicos dijeron expresamente y el significado implícito de sus afirmaciones.

De ahí que mi tarea haya consistido, hasta ahora, en encontrar dicha conexión en la discusión desde ambas posturas, y enlazarlas en un solo tronco común, para asimilar todo el significado de la Polémica Einstein-Bohr y transformar el “diálogo para sordos”, en el que se presenta si no se traza un puente en la comprensión y la comunicación de las ideas de ambos físicos, en una discusión filosófica racional, con puntos de partida diferentes, es cierto, pero, al menos, los términos, en los que se discute el problema, guardan una relación común entre sí; lo cual abre la puerta a la claridad de una cuestión que, si bien es profunda, no tiene por qué ser oscura.

Volviendo al tema central de la discusión, en este capítulo he argumentado que, si una teoría tiene contenido intuitivo, entonces garantiza que es una teoría realista y que, por tanto, describe y explica la realidad física. Ahora bien, esto es lo más difícil de demostrar. En el primer apartado expuse cuál fue la postura de Einstein hacia la física cuántica desde esta perspectiva, la del contenido físico: él sostuvo que aquél ha de contener la posibilidad de representación espacio-temporal; esto lo justifica a partir del principio de separabilidad de los sistemas físicos, el cual falla en el campo de la física cuántica.

En relación con este último aspecto de la Polémica, concluí que la alternativa física de Einstein a la teoría cuántica no proponía, como él mismo reiteró muchas veces, un retorno al esquema clásico, porque el modelo de continuidad, desde el cual parte su búsqueda de una nueva teoría, no permite retomar el modelo del atomismo materialista que reinaba

en el ideal clásico de descripción física. Según la fórmula de la equivalencia entre masa y energía, Einstein entiende la materia, que se define por la masa, como una forma concentrada de energía y la energía como una forma concentrada de materia, de tal forma que los “puntos materiales” de la física de Newton eran, sólo, formas de energía concentrada que podían diluirse en campos energéticos, de naturaleza continua.

Por esta razón, él mismo afirma, frecuentemente, que su programa es de “tipo maxwelliano”. El propio Einstein sabía muy bien que, si algún tipo de determinismo podía restaurarse a partir de esta idea, no podría ir ligado al materialismo decimonónico, así como, tampoco podría conseguirse buscando una interpretación causal de los principios estadísticos de la física cuántica.

Esta concesión de Einstein apoya la siguiente afirmación: una nueva teoría física futura no sustituiría a la actual en su campo de aplicación (o dominio científico) ni tampoco puede ser una ampliación de su núcleo teórico. La sustitución implicaría la invalidez de esta teoría dentro de sus propios límites; para encontrar otra teoría se tendría que ampliar estos límites y con ellos se ensancharía el marco conceptual de la ciencia, o si se prefiere, ya que Einstein rechazó la revisión de los marcos conceptuales, se produciría un cambio en su base epistemológica. Este cambio conllevaría, como ya he dicho, un determinismo que no puede estar basado en el atomismo, pero una explicación causalmente determinista, del comportamiento cuántico de los sistemas individuales, que no se apoye en la localización espacio-temporal exacta de un punto material, exige un cambio completo y radical en nuestra concepción, física y epistemológica, de determinismo. ¿Cómo se podría entender la evolución causal de un objeto material si la materia es concebida, desde la noción de campo, como una forma diluida de energía y no como una manifestación macroscópica de sus constituyentes atomísticos? Esta dificultad fue con la que Einstein se encontró una y otra vez cuando afirmaba que no conseguía dar con la ecuación “libre de singularidades”.

Si concretamos la pregunta anterior, podría ser formulada, por ejemplo, así: ¿cómo podemos predecir la posición futura de una *partícula atómica* sin que se necesite definir con exactitud su momento? Ésta es la cuestión, porque el determinismo, que surgió del atomismo materialista, establecía la posibilidad de predecir, con certeza igual a la unidad, la posición de un objeto si su localización y su momento inicial eran bien conocidos.

Un determinismo, basado en la continuidad y no en el atomismo, no puede definirse de estos mismos términos; es decir, una futura teoría que adopte una forma determinista ha de ampliar el marco conceptual de las teorías anteriores, de la física cuántica y también de la física clásica, el retorno a esta última lo ha hecho imposible la primera. Tal ampliación debería permitir definir el determinismo desde una nueva topología del espacio, el cual estaría regido por una causa geométrica y no dinámica; de esta forma, se obtendría al menos, la posibilidad lógica de buscarlo en la estructura de las nuevas geometrías y olvidar su acepción dinámica. Einstein debió haber insistido más en este aspecto, pero él mismo declaró no estar, suficientemente, familiarizado con las nuevas geometrías para seguir su búsqueda por este camino.

Retomaré, nuevamente, el transcurso de este capítulo. Acabo de exponer que el experimento de Aspect parece demostrar que, de hecho, el postulado de la localidad no se respeta en el ámbito de la microfísica, lo cual significaría que la física cuántica está en lo cierto cuando sus principios violan este postulado. Pero, en esto he tomado la palabra a Reichenbach, cuando afirmó que este problema sólo puede dilucidarse a partir de una investigación filosófica, y sólo he tratado su planteamiento experimental de una manera marginal. Pues, a pesar del resultado del experimento de Aspect y aun en el caso de que sean aceptadas sus conclusiones, no se puede concluir que la física cuántica sea físicamente completa, a menos que se justifique el carácter intuitivo de ésta, al que apelaba Bohr desde su filosofía de la complementariedad, porque Einstein tenía razón al afirmar que el contenido físico de una teoría ha de referirse a algún tipo de intuición u ordenación del material sensible.

A lo largo de todo este trabajo se ha podido ver que la intuición espacial, como elemento prioritario, ha quedado completamente desterrada de la base conceptual de la física; sólo nos queda la temporal. Si ésta también falla, se debería concluir que la física cuántica no es intuitiva y que, por tanto, no describe la realidad: no sería una teoría sobre el mundo físico, sino meramente un instrumento de manipulación sobre aquél.

Con ello, el ideal de la ciencia moderna, que expuse al principio de este estudio, se vendría abajo y, sólo entonces, la ciencia física entraría en una auténtica crisis, un período de oscuridad insostenible acerca del conocimiento del mundo que nos rodea. Entonces, pero, sólo entonces, habría que buscar una nueva teoría acerca del microcosmos, ya que el objetivo fundamental de la ciencia es describir y explicar el mundo. Que esta explicación sea parcial y acotada desde el punto de vista filosófico, es lo de menos porque esta meta también era a la que Bohr aspiraba, incluso,

cuando afirmaba que la física no es una descripción de la realidad en sí misma, ya que no podemos saber “objetivamente” (inambiguamente) nada de ella cuando no la observamos, sino que es algo que tiene que ver con lo que podemos conocer de ella.

Esto se debe al significado físico esencial del cuanto de acción: el carácter estadístico de las propiedades mecánicas en física cuántica es consecuencia de la unión, por un lado, de los modelos ondulatorios y corpuscular y, por otro, de las propiedades dinámicas y cinemáticas, que dan lugar a la incompatibilidad de las magnitudes canónicamente conjugadas; estas condiciones iniciales de la teoría están impuestas por la constante de Planck.

Ya en los capítulos segundo y tercero analicé esta circunstancia: en mecánica cuántica, las magnitudes dinámicas han perdido su sentido en el modelo corpuscular, por lo tanto, no se construyen a partir de las cinemáticas, que sí conservan sus valores de corpúsculo. De ahí que magnitudes como la energía y la cantidad de movimiento sólo tengan un sentido físico bien definido en el modelo ondulatorio, ya que éstas se definen y se calculan a partir de magnitudes ondulatorias, como la frecuencia y la longitud de onda. Sin embargo, sólo se podría realizar esto buscando la forma de *definir las propiedades dinámicas* de los sistemas físicos, impulso y cantidad de movimiento, *sin vincularlas a las magnitudes ondulatorias* de frecuencia y longitud de onda, ya que es la unión de los modelos ondulatorio y corpuscular, con su íntima vinculación de los valores cinemáticos y dinámicos, en el cuanto de acción, aquello que impide dotarles de valores intermedios, puesto que éstos se han de conjugar confinados dentro de la cantidad límite y constante que impone h ; de esta forma alteran sus valores numéricos para no sobrepasar el valor fijo y exacto del cuanto de acción, o múltiplos enteros suyos.

Ahora bien, la única manera de romper con esta situación es eliminar del formalismo el valor como constante que posee el cuanto de acción y transformarlo en una variable física, que pueda tomar cualquier valor numérico (esto es, valores intermedios por debajo de $6,55 \times 10^{-27}$ ergios por segundo). Éste sería, realmente, el objetivo que deberían cumplir las “variables ocultas” de una teoría que persigue ser una explicación causalmente determinista del mundo atómico; sólo que la mayoría de ellas no se dan cuenta de esto.

Por lo tanto, las condiciones de partida para salir de la física cuántica y construir una nueva teoría de corte causal-determinista, que no tuviera las implicaciones epistemológicas de ésta, han de ser estas dos: por un lado, es necesario encontrar un nuevo método formal que permita

calcular teóricamente, definir físicamente y medir experimentalmente las propiedades mecánicas del movimiento y, por otro lado, que tal método no recurra, en ningún caso, a magnitudes ondulatorias para dar con las propiedades dinámicas de los sistemas. Dado que su unión, a través de h , es la causa de la dualidad teórica, del indeterminismo físico de las magnitudes mecánicas del movimiento y de la naturaleza estadística del formalismo.

Sin embargo, esta construcción teórica nunca podría considerarse una explicación causal-determinista de la física cuántica porque, como ya he dicho, se ha de buscar fuera de los límites teóricos y empíricos una nueva manera de definir las propiedades mecánicas de los microsistemas, la cual sea distinta a la que establece el cuanto de acción. No obstante, la propia ciencia, a través de su desarrollo y proceso de elaboración, nos ha enseñado que esta tarea sólo puede iniciarse a partir de ciertos “indicios físicos”, los cuales podrían ser de dos tipos: teóricos o empíricos.

Esta condición nos lleva a preguntarnos si existen en la actualidad tales tipos de indicios. Al buscar la respuesta, nos encontramos con el siguiente hecho: el experimento de Aspect, así como otros realizados en el mismo contexto, no puede falsar ni demostrar la completud de la física cuántica porque el fenómeno que es sometido a la prueba experimental está implícito en su formalismo matemático, esto es, la inseparabilidad cuántica. Por lo cual, el experimento sólo muestra, una vez más, la consistencia de esta teoría con los hechos empíricos que caen dentro de su ámbito de aplicación. De modo que no disponemos de indicios experimentales que puedan contradecirla: aún no se ha descubierto ningún fenómeno sin explicación cuántica y, por ello, no es posible diseñar experimentos cruciales en un contexto experimental apropiado para decidir sobre su completud.

Por otro lado, analizando la vía teórica, he llegado a la siguiente conclusión: la constante de Planck establece que la investigación debe partir de un nuevo método matemático que permita definir y calcular las magnitudes dinámicas a partir de las cinemáticas, sin que mediaten las propiedades ondulatorias, tal y como ocurría en el marco de la mecánica clásica. De forma que una evidencia teórica, que avalase la posibilidad lógica de alcanzar una formulación teórica de estas características, podría buscarse en otro modelo geométrico, desde el cual se definan las propiedades cinemáticas a partir de otras características espacio-temporales distintas de aquellas que se definen en el marco euclídeo; pero sin perder la condición de devolverles su capacidad de servir de base para las propiedades dinámicas. Sólo de esta manera, el nuevo formalismo teórico

no dependería de las variables ondulatorias de frecuencia y longitud de onda para calcular la energía o el impulso, por ejemplo, con lo cual se eliminaría el vínculo que la constante de Planck introduce en ellas y ésta podría convertirse en una magnitud variable.

A partir de aquí, puede verse claramente que el procedimiento de von Neumann para demostrar la validez y la completud de la física cuántica carece de fundamento, ya que axiomatiza el valor constante del cuanto de acción, convirtiendo su demostración en un razonamiento circular, con petición de principio, ya que se ha de salir del contexto teórico de h , cosa que no hace von Neumann, para poder plantear la posibilidad lógica de que exista otro mecanismo de definición y cálculo, como premisa que posteriormente será falsada por el absurdo en su conclusión; tal teorema sólo prueba su consistencia interna.

Durante el último apartado de este capítulo he analizado las posibilidades lógicas y empíricas que existen para dilucidar la cuestión de la completud de la física cuántica; es decir, las posibilidades de completar o perfeccionar esta teoría y la conclusión de dicho estudio es la siguiente: no existe una demostración lógicamente válida, ni pruebas experimentales, acerca de su completud.

Así como tampoco tiene sentido pretender completarla a través de una “teoría de variables ocultas”, ya que toda explicación causalmente determinista es teóricamente incompatible con la naturaleza estadística del formalismo cuántico, el cual impide toda alteración formal a partir de sus postulados, los cuales, teóricamente y experimentalmente, dejan a la teoría perfectamente definida, delimitada y cerrada.

Por tanto, en su formalismo no puede buscarse las causas físicas responsables del mecanismo clásico capaz de restaurar el determinismo en la naturaleza y comportamiento de los microsistemas. En consecuencia, cuando Einstein se dio cuenta de esto, en sus últimos años de vida, cambió el enfoque de su investigación y se propuso buscar la nueva teoría, que vendría a sustituir a la física actual, fuera del ámbito de ésta; es decir, indagó en las nuevas geometrías para elaborar una teoría que no contuviera la cantidad fija y constante del cuanto de acción, dado que es la responsable fundamental de todas las características de la actual física, incluso de la inseparabilidad cuántica.

Todos éstos son los argumentos en los que me baso para afirmar que ni el experimento de Aspect ni el teorema de completud de von Neumann pueden dar un veredicto acerca de la completud de la física cuántica, así como tampoco existe actualmente ningún otro tipo de procedimiento teórico o experimental que pueda hacerlo.

Así, mientras esperamos a un nuevo “Mesías” de la física, capaz de sacarnos de la situación actual, es posible realizar un análisis filosófico, en los términos en que Einstein y Bohr se plantearon el problema de la completud, para proponer una solución y una respuesta a la polémica que ambos físicos dejaron abierta.

Los términos en los que se plantea esta polémica, a los que me refiero, aluden siempre al contenido intuitivo de las teorías físicas y me han llevado a la siguiente definición de “intuición”, en su sentido físico y no en el sentido general: por un lado, es una *idea* (elemento intelectual) que, por otro lado, *se ajusta a la experiencia* (elemento de la realidad).

En cambio, el término “intuitivo” en su acepción general se define como sinónimo de percepción íntima espontánea e instantánea, sin que medie razonamiento alguno. Sin embargo, como ya advertí en otro momento, muchas ideas surgen de la mente de los científicos, pero no todas tienen la corroboración de la experiencia, y muy pocas la gran insistencia de ésta en favor de su validez y de su sentido físico, y no meramente heurístico; por este camino he llegado a mi definición de “intuición”: idea que se adecua o se ajusta a la experiencia; hecho aquél que además lo apoya.

En otras palabras, la intuición conecta *idea* y *experiencia* y, en este aspecto, una intuición no puede ser una hipótesis instrumental, heurística, sin significado físico ni tan siquiera una especulación gratuita, pues su carácter real queda manifiesto en dicha conexión entre lo empírico y lo ideal, haciendo que la teoría posea el rango de realidad indubitable, sea este realismo del tipo que sea. La polémica *debería estar* en decidir, definir y justificar el tipo de realismo que le pertenece; pero no en dudar de su realidad.

Por este motivo, he juzgado que la oposición de Einstein a la física cuántica no se debe, primordialmente, a que sea una teoría indeterminista, sino a que no la puede considerar una teoría *realista*, que describa fielmente la realidad, ya que Bohr no justificó su postura epistemológica. De forma que, cuando Einstein afirma que la mecánica cuántica no tiene el contenido intuitivo necesario para conectar la teoría con la realidad, al final quiere decir que, detrás de la descripción cuántica de los fenómenos físicos, no existe una ontología que garantice el supuesto gnoseológico, acerca del uso analógico de los conceptos y su conexión simbólica con la realidad, que Bohr postula en su interpretación epistemológica de aquélla.

Einstein tiene razón al criticar la carencia de una ontología, tras la fundamentación epistemológica que ofrece la complementariedad; pero, aquello que sí es discutible es el hecho de *exigir* que sea una ontología del tipo clásico, basada en un realismo ostensivo a través de la intuición

espacial, el cual se caracteriza por ofrecer una descripción física de la realidad independiente y de corte determinista, ya que exige la representación autónoma de los sistemas físicos en un marco espacio-temporal real. Esta exigencia de Einstein sí es arbitraria, ya que excluye otros tipos de realismo.

Ahora, ya puede volverse sobre la complementariedad y mirarla con los ojos de Einstein: en definitiva, la complementariedad pretendía ser una interpretación, como aquéllas otras que he mencionado en el anterior epígrafe, en lenguaje cualitativo (ordinario) de la física cuántica, que nos ofreciera una explicación de cómo es la realidad, al menos a nivel microfísico. No obstante, no se justificó a sí misma; ninguna razón avaló esta interpretación, que, así, presentada, resulta arbitraria.

De esta manera, pueden darse múltiples interpretaciones de la realidad: todas ellas distintas y todas ellas sin una sola razón que las justifique; si la tuvieran, podrían ofrecernos un motivo para preferir una de ellas entre las otras. Pero, si da igual la interpretación que se use y ellas dan diferentes versiones acerca de cómo es la realidad, este “relativismo epistemológico” no dice nada de la realidad y lleva a un idealismo fantasmagórico, totalmente alejado de todo tipo de realismo, incluso del realismo “tan matizado”, que Bohr quiso mantener.

No es extraño que un hombre de la talla filosófica de Einstein viera esto tan claramente y rechazó la complementariedad por tal motivo, ya que él sí había justificado su postura epistemológica, sí le había dado una base ontológica y una fundamentación gnoseológica (acerca de cómo se produce el conocimiento científico); la postura filosófica de Einstein no es tan novedosa y rica como la de Bohr, pero sí es más completa, está, plenamente, desarrollada y, por ello, es mucho más firme y sólida.

Bohr, en cambio, pensó que tales conductos, para la justificación de su postura epistemológica, estaban vetados en su marco de la complementariedad por la naturaleza misma de su filosofía. En esto *Bohr estaba equivocado*: quizás, la física no pueda ir más allá de la relación entre el objeto y el sujeto empírico, el dispositivo de medida; pero, tanto su doctrina del “actor-espectador” como la del “uso analógico” de los conceptos necesitan una fundamentación gnoseológica y una ontología como base explicativa.

Mi crítica a Bohr consiste en lo siguiente: si se aventuró en la especulación filosófica cuando se pronunció tímidamente por los aspectos ontológicos, entonces debió seguir, como hizo Einstein, y darle una base crítica a ese coloso edificio conceptual que había construido a partir del esquema matemático de la física cuántica.

Este esquema matemático puede ser firme, consistente y “completo”, pero no lo es su interpretación epistemológica (su marco conceptual) si no se le da una justificación racional, más allá del esquema matemático en sí y más allá de la mera especulación, filosóficamente gratuita, de su propuesta ontológica. Sin esto, las interpretaciones pueden ser, y de hecho lo son, múltiples, y esta “riqueza” de interpretaciones de *tanto y tan distinto que nos dicen sobre la realidad, no nos dicen nada*.

Tras todas estas reflexiones, cabe preguntarse: ¿puede ser el “simbolismo” de Bohr una *alternativa realista* al “referencialismo ostensivo” del materialismo clásico, por un lado, y, por otro, al tipo de realismo de Einstein?

En el próximo y último capítulo propongo mi respuesta a esta cuestión a través de una *reconstrucción libre* que realizo de la tesis de Bohr. Mi objetivo es resolver la Polémica desde el análisis filosófico para contestar a la pregunta que formula Einstein acerca de su completud y referida al contenido intuitivo.

En estos términos bucearé en la propuesta de Bohr, que pasa necesariamente por plantear un nuevo tipo de realismo, el cual Einstein no aceptó como tal, pero que ha de considerarse al menos como una posibilidad realista, cuya justificación Bohr jamás ofreció pero que podría encontrarse en otro elemento intuitivo, que no sea el espacio.

CAPÍTULO VII:

«MÁS ALLÁ DE LA COMPLEMENTARIEDAD»

Si se admite con Bohr que la física cuántica es una teoría con contenido intuitivo o físico y, por lo tanto, que es completa ya que, a pesar de ofrecer una descripción fenomenista de la realidad, ésta es captada por la teoría, entonces se ha de demostrar que ambas mantienen una conexión de tipo analógico, no directo, que garantiza, en último término, la exigencia realista de ser algo más que un instrumento de cálculo y predicción.

Pero Bohr no ofreció ninguna demostración; no justificó este tipo de conexión con la realidad. Por ello, propongo ir más allá de la complementariedad para buscar dicha justificación o fundamento filosófico específico, ya que la vía tradicional, que ha venido utilizando la ciencia clásica para garantizar el realismo de una teoría, ahora es impracticable: la física cuántica reconoce que su descripción del mundo físico sólo se refiere al “fenómeno”, nunca a la realidad físicamente independiente. Por lo tanto, ¿qué tipo de realismo es éste y cómo se alcanza? ¿Cómo una descripción fenomenista puede salir de su fenomenismo y garantizar que está describiendo, de alguna manera, la realidad física porque, según afirma aquélla, contiene, de hecho, elementos objetivos que se dan tanto en la teoría como en la realidad?

¿Cómo justificar que la referencia empírica de un concepto con contenido intuitivo no sea el objeto tal cual es, sino un fenómeno, inseparable del sujeto? ¿Cómo un concepto puede referirse a la realidad del mundo físico, no a través de una imagen¹, sino a través de una analogía o símbolo? Si un concepto no puede estructurar, figurar, o modelar un objeto, esto es, siguiendo la tesis de Wittgenstein, ofrecernos su forma o estructura, entonces ¿qué puede hacer él para referirse al objeto y crear, así, un vínculo de referencia con él? ¿Puede ese vínculo utilizar una vía “analógica” para representar al objeto, en lugar de la clásica vía del isomorfismo espacial?

¹ Imagen ostensiva, pictórica o especular, donde se da una relación de isomorfía o de coincidencia entre el espacio físico real y el espacio gnoseológico, el de nuestra percepción y entendimiento.

El simbolismo de Bohr se sitúa en el nivel ontológico del lenguaje, en la semántica y no en la morfología; de tal modo que la referencia de los términos descriptivos de la física es simbólica no porque usemos símbolos lingüísticos, teóricos o matemáticos, sino *símbolos de la realidad*. Tales símbolos son analógicos, con respecto a la realidad física independiente, porque la referencia de los conceptos ya no es el objeto sino el fenómeno, el cual sólo puede ser una representación simbólica del mundo físico. Este tipo de representación garantiza su conexión con la realidad, el realismo de la descripción cuántica, y, por lo tanto, su salida y fuga del idealismo, del subjetivismo y del simple fenomenismo, apelando a la existencia de una vía analógica, que viene a sustituir a la vía clásica del isomorfismo pictórico.

Pues bien, si la analogía de Bohr es una pseudo-imagen que se aproxima a lo que el objeto es, pero cuya representación simbólica no puede ofrecer modelos pictóricos, imágenes plásticas del mundo físico y sólo puede formar “modelos confusos” de la realidad, entonces surgirán preguntas como éstas: *¿En qué se aproxima y en qué se distancia? ¿Qué rasgos de ese modelo son más propios del mundo y cuáles se alejan más de la realidad?* La tesis de Bohr sobre el significado analógico de los conceptos descriptivos no puede resolver estas cuestiones; se necesita un fundamento intuitivo, propiamente dicho, de ese vínculo analógico del término lingüístico con su referencia empírica, para poder responder a aquellas preguntas y dejar bien definido en qué sentido la física cuántica es intuitiva y cómo consigue ese carácter suyo de intuición, por analogía con los términos clásicos².

Este capítulo propone una fundamentación de este tipo, basada en modelos temporales, que garanticen la posibilidad de aquella vía analógica del contenido intuitivo de la descripción complementaria, en su referencia con el objeto. Pero este tipo de fundamento intuitivo no puede ajustarse a la ontología tradicional, o clásica, por tanto, carecerá de ésta si no conseguimos ofrecer otro modelo ontológico sobre la realidad física³.

² Es en este punto donde se ha de cambiar el enfoque: abandonar la epistemología de Bohr y pasar a la ontología, ya que ésta es la única que puede justificar una fundamentación intuitiva. La física espacialmente intuitiva (la clásica y también la de Einstein) venía avalada por toda una ontología, de la que la física cuántica parece carecer.

³ Si aquél existiese justificaría la fundamentación intuitiva temporal, que garantizaría el uso analógico de las nociones clásicas en el marco de la complementariedad. A su vez, si se pudieran ajustar las condiciones generales de posibilidad del conocimiento a las condiciones epistemológicas y gnoseológicas de la física cuántica, se encontraría un camino para esbozar las condiciones de posibilidad de los objetos cuánticos y, con ellas, un marco

7.1) Investigaciones acerca de la Intuición Temporal

En los capítulos III y IV estudié las condiciones epistemológicas que impone la física cuántica a la descripción física y que Bohr refleja en su filosofía de la complementariedad. A lo largo de los capítulos anteriores a éste, V y VI, se pudo comprobar que, ante la pregunta acerca del tipo de conocimiento que nos ofrece la física cuántica de la realidad, Einstein responde que se trata de un conocimiento indirecto e incompleto de aquélla. Sin embargo, está dispuesto a admitir que los conceptos descriptivos de una teoría pueden ser “indirectos”, de modo que, “un conocimiento directo de la realidad”, a través de conceptos que pueden ser *indirectos*, sólo puede significar que haya una conexión entre ésta y la teoría: una conexión que puede llamarse “de corte clásico” porque está basada en la intuición espacial.

No obstante, dado que el éxito empírico de la física cuántica y su coherencia matemática interna están fuera de toda duda (y en la medida en que Einstein sigue sin aceptarla, a pesar de reconocer aquello), tal conexión no queda demostrada ni por lo uno ni por lo otro; tal cosa sólo puede ser garantizada a través de un criterio filosófico sobre la naturaleza del conocimiento y de la realidad física. Razón por la cual, aquello que Einstein plantea es si podemos considerar a la física cuántica como una teoría completa conforme a un determinado principio ontológico, que él defiende. Su punto de vista es, en este sentido, puramente gnoseológico: qué garantiza el conocimiento científico del mundo físico y si la mecánica cuántica cumple tal garantía. Ante esta crítica de Einstein, se ha de analizar la física cuántica en los mismos términos y, por ello, habrá que ver, en primer lugar, si hay alguna teoría gnoseológica que pudiera justificarla como descripción completa y realista de la Naturaleza; y más tarde, en el próximo apartado, partiendo de las investigaciones de estos pensadores que expongo a continuación, propondré una reconstrucción de las *condiciones gnoseológicas* de la complementariedad, aquellas que sólo se refieren a nuestro entendimiento o capacidad intelectual de captar y representar el mundo microfísico, dejando para el final las *condiciones físicas* de los propios objetos cuánticos, esto es, aquellas que la teoría cuántica impone a

ontológico. Con esto, se daría una posible solución a la Polémica, respondiendo así a la gran objeción de Einstein, que Bohr dejó sin resolver.

los elementos extralingüísticos, u “objetivos” como diría Einstein, de la región atómica.

a) La fundamentación intuitiva del conocimiento: la tesis kantiana

Comenzaré volviendo sobre la tesis de Bohr acerca del lenguaje físico: el lenguaje de la física clásica es un refinamiento del lenguaje natural y éste es imprescindible para describir físicamente los fenómenos en lenguaje informal. Esta tesis se origina en el hecho de que el lenguaje natural o cualitativo⁴ es una extensión de nuestro pensamiento, de modo que los términos del lenguaje clásico son los únicos capaces de describir los fenómenos físicos porque son conceptos espacio-temporales, al igual que lo son los términos de nuestro lenguaje cotidiano y nuestras formas de percepción y de entendimiento.

Kant fue el primer pensador que sistematizó una teoría del conocimiento que arrancaba de la noción de espacio y tiempo como formas a priori del entendimiento humano⁵: las intuiciones con las que organizamos el “caos de sensaciones” y a partir de las cuales comienza nuestro conocimiento y comprensión del mundo; en este contexto, una “fundamentación intuitiva” es toda aquella justificación del conocimiento humano sobre la realidad externa a él, la cual viene garantizada por las intuiciones de espacio y/o de tiempo. Por esta razón, todos los conceptos descriptivos de la física han de ser construcciones espacio-temporales y, en la medida en que esto sea así, aquéllos serán considerados “intuitivos” porque son los responsables de que podamos comprender el mundo y acceder a él; son las *condiciones de posibilidad del conocimiento*. Este es el mismo motivo que movió a Kant para empezar la CRP con estas conocidas palabras:

“Sean cuales sean el modo o los medios con que un conocimiento se refiera a los objetos, la *intuición* es el modo por medio del cual el conocimiento se refiere inmediatamente a dichos objetos y es aquello a

⁴ Digo “lenguaje cualitativo” no en sentido vulgar, donde se incluyen las cualidades secundarias, sino como aquél ya matemáticamente cuantificado (cuantitativo), pero distinto del lenguaje meramente matemático, al cual me referí en el primer capítulo.

⁵ Antes de Kant, la filosofía moderna buscaba la garantía del conocimiento en Dios, un dios matemático y geómetra, que aportaba el aval de una especie de “a priori” divino; incluso Newton decía que el espacio absoluto era el sensorio de Dios.

que apunta todo pensamiento en cuanto medio. Tal intuición únicamente tiene lugar en la medida en que el objeto nos es dado. Pero éste, por su parte, sólo nos puede ser dado [al menos a nosotros, los humanos] si afecta de alguna manera a nuestro psiquismo”⁶.

Éste es el aspecto, o carácter, gnoseológico que posee el concepto de intuición en el que se basa mi tesis. Pero, nótese que en tal definición, Kant aún no ha aludido al carácter transcendental de las intuiciones, la cual es el pilar de su sistema filosófico, que no encaja con la postura de Bohr.

Aún más, tanto Heisenberg y Bohr como Einstein, suponen que una teoría con contenido intuitivo ofrece una descripción física de la realidad que cumple la exigencia básica del realismo: tal teoría contiene elementos objetivos que la ponen en correspondencia con el mundo exterior que están describiendo; dicho de otro modo, los términos del lenguaje físico tienen, o han de tener, una referencia o significado extralingüístico. Este significado extralingüístico de los términos que se refieren (o que aplicamos) a los elementos objetivos, si viene garantizado por el contenido intuitivo de la teoría es porque las intuiciones de espacio y tiempo no son, únicamente, las “condiciones de posibilidad del entendimiento humano”, sino también las “condiciones de posibilidad de los objetos reales del mundo físico”. Este doble carácter, gnoseológico y físico, es el mismo que poseen las intuiciones kantianas y es el responsable de la conexión entre la teoría y el mundo, entre la descripción y lo descrito:

“Con ocasión de los conceptos de espacio y tiempo hemos puesto ya de manifiesto, sin grandes dificultades, que, aun siendo conocimientos *a priori*, tienen que referirse necesariamente a objetos, haciendo posible un conocimiento sintético de éstos con independencia de toda experiencia. En efecto, si se tiene en cuenta que sólo mediante esas formas puras de la sensibilidad se nos puede manifestar un objeto, es decir, convertirse en objeto de la intuición empírica, entonces espacio y tiempo constituyen intuiciones que contienen *a priori* las condiciones de posibilidad de los objetos en cuanto fenómenos, y la síntesis que en dichas intuiciones se verifica posee validez objetiva”⁷.

De nuevo, en este discurso, vuelve a aparecer Kant en las tesis de estos físicos: para que las intuiciones, las formas *a priori* de la sensibilidad, garanticen la objetividad y, sobre todo, la verdad del conocimiento, o dicho

⁶ KANT, I., Crítica de la Razón Pura, p. 65 (A19/B33).

⁷ KANT, I., Crítica de la Razón Pura, p. 123 (A89/B121-B122).

de otro modo, el realismo de una teoría física, el espacio y el tiempo han de ser algo más que elementos subjetivos de nuestro entendimiento. Por esto se afirma que las intuiciones representan las condiciones bajo las cuales se nos dan los objetos en la intuición, de ahí que la sensibilidad contenga a priori las condiciones de dichos objetos (a diferencia del entendimiento y sus categorías). Sólo se sale del psicologismo y del idealismo si aquéllas son capaces de justificar la conexión mente-mundo, defendiendo su carácter de elementos objetivos. Pero, las semejanzas con las ideas kantianas se quedan aquí, ya que a estas intuiciones no sólo les atribuyó valor objetivo (físico) y gnoseológico, también les añadió un carácter trascendental, a lo que él llamó “intuiciones puras”, para justificar la validez universal del conocimiento científico, a través de la posibilidad de juicios sintéticos *a priori*. Éste fue el esfuerzo que realizó Kant para poder denominar a su filosofía “Idealismo Trascendental”:

“Nuestra exposición enseña, pues, la realidad (es decir, la validez objetiva) del espacio en relación con todo lo que puede presentárenos exteriormente como objeto, pero establece, a la vez, la *idealidad* del mismo en relación con las cosas consideradas en sí mismas mediante la razón, es decir, prescindiendo del carácter de nuestra sensibilidad. Afirmamos, pues, la *realidad empírica* del espacio (con respecto a toda experiencia externa posible), pero sostenemos, a la vez, la *idealidad trascendental* del mismo, es decir, afirmamos que no existe si prescindimos de la condición de posibilidad de toda experiencia y lo consideramos como algo subyacente a las cosas mismas. Exceptuando el espacio, no hay ninguna representación subjetiva y referente a algo *exterior* que pudiera llamarse *a priori* objetiva”⁸.

No obstante, a pesar del trabajo de Kant para justificar aquellas dos primeras tesis generales, a partir de la Estética y de la Deducción Trascendental, con el objetivo de probar la necesidad de las *intuiciones puras* de espacio y tiempo a la hora de fundamentar la validez del conocimiento físico, la complementariedad no necesita el método trascendental ni el carácter *a priori* de las intuiciones puras. Por ello, al final mostraré cómo puede Bohr, entonces, defender su tesis acerca de los conceptos físicos, de su contenido intuitivo, y de su referencia (“real”) al objeto, aunque definido siempre como *fenómeno*.

Sin embargo, precisaré las ideas de Kant para matizar las diferencias. Para Kant el fundamento de la matemática está en una

⁸ KANT, I., Crítica de la Razón Pura, p. 72 (A28/B44).

percepción *a priori* o intuición pura, que se diferencia de la intuición empírica por ser aquella anterior a la experiencia de nuestras percepciones sensitivas⁹. A lo largo de la Estética demuestra que las intuiciones son las condiciones subjetivas de toda representación sensible¹⁰. Retrocederé un momento para recordar que las intuiciones no son conceptos porque son “referencias inmediatas a un objeto único” y que las intuiciones puras son las condiciones de los objetos en tanto condiciones de toda percepción o intuición empírica posible: la intuición pura, o *a priori*, es gnoseológicamente anterior a la intuición empírica. Ahora bien, si el espacio como intuición pura es el fundamento de la geometría, tenemos resuelto el problema del carácter intuitivo de la geometría como ciencia universal y necesaria construida a partir de juicios sintéticos, al mismo tiempo que se acaba con el misterio acerca de la conexión entre geometría y realidad, entre conocimiento subjetivo y mundo objetivo, ya que la intuición pura del espacio coincide con la intuición empírica dentro de los límites de la geometría euclídea.

En favor de la brevedad, he de prescindir de los conocidos argumentos de Kant que avalan el carácter de intuición pura del espacio como un tipo de percepción anterior e independiente de toda percepción empírica o experiencia sensible¹¹. Aquí sólo puedo subrayar que el *a priori* espacial es un espacio infinito, el cual no puede percibirse directamente por ninguno de nuestros órganos sensitivos, ya que éstos no perciben lo infinito; sólo percibimos empíricamente el espacio cuando lo limitamos. Por otro lado, podemos imaginar un espacio infinito vacío de cuerpos, esto es, puede pensarse el espacio gnoseológico, como intuición pura, sin recurrir al espacio empírico; sin embargo, no podemos hacer lo contrario: pensar en cuerpos sin espacio o en el espacio empírico, limitado por ellos, sin el *a priori* del espacio infinito. Por tanto, este espacio, que es el de la geometría, no proviene de la percepción empírica, sino que es anterior a

⁹ Adviértase ya que para Bohr no es anterior a ésta y por ello no puede tratarse de intuición pura (método trascendental). El físico danés sólo se refiere a las intuiciones en tanto empíricas: salidas de nuestras percepciones y experiencias.

¹⁰ “El espacio es, pues, considerado como condición de posibilidad de los fenómenos, no como una determinación dependiente de ellos, y es una representación *a priori* en la que se basan necesariamente los fenómenos externos. En consecuencia, tal representación no puede tomarse, mediante la experiencia, de las relaciones del fenómeno externo, sino que esa misma experiencia externa es sólo posible gracias a dicha representación”. KANT, I., Crítica de la Razón Pura, p. 68 (A24/B39).

¹¹ Cf. KANT, I., Crítica de la Razón Pura, pp. 67-74 (A23-A30/B37-B45).

ella y, además, es su condición de posibilidad porque la percepción empírica del espacio supone ya un enclave espacial anterior a la experiencia misma de percibir cuerpos extensos.

Pasaré ahora a la aritmética y a la otra intuición pura, el tiempo. Si el tiempo es intuición y no concepto, al igual que el espacio, no puede ser definido pero sí supuesto por la aritmética porque está en su propia base, *como condición indispensable de toda serie sucesiva*¹². El tiempo infinito es una intuición pura *a priori* porque no puede ser percibido por ningún sentido y, no obstante, hemos de suponerlo porque sin él no podríamos comprender la posibilidad de cualquier tipo de sucesión y, en concreto, la pura sucesión irreversible, la cual no se puede definir sino, únicamente, “intuir”: *sentirla inmediatamente en el fluir incesante de la conciencia*. Por lo tanto, el tiempo no es sólo la condición de posibilidad de la aritmética, esto es, de nuestro conocimiento sobre cosas que se suceden, sino, además, condición de posibilidad de esas mismas series; he aquí de nuevo, como en el caso del espacio, la conexión o congruencia de nuestro conocer con la realidad.

A partir de esta intuición temporal podemos formarnos representaciones condicionadas por el tiempo, que son *reales* en él pero que no tienen por qué serlo además en el espacio; sin embargo, aquél tiene prioridad sobre éste, ya que, no es posible tener percepciones propiamente espaciales que no se den también como percepciones o intuiciones temporales; es decir: “El tiempo es la condición formal *a priori* de todos los fenómenos”¹³. La percepción de todo objeto material, a partir de la cual

¹² Los argumentos de Kant a favor del tiempo como intuición pura y base de la aritmética están en la misma línea que los que empleó para el espacio y la geometría. Cf. KANT, I., *Crítica de la Razón Pura*, p. 74-82 (A30-A41/B46-B58).

¹³ KANT, I., *Crítica de la Razón Pura*, p. 77 (A34/B50-B51). A esta afirmación le sigue su correspondiente explicación: “El espacio, en cuanto forma pura de toda intuición externa, se refiere sólo, como condición *a priori*, a los fenómenos externos. Por el contrario, toda representación tenga o no por objeto cosas externas, corresponde en sí misma, como determinación del psiquismo, al estado interno. Ahora bien, éste se halla bajo la condición formal de la intuición interna y, consiguientemente, pertenece al tiempo. En consecuencia, el tiempo constituye una condición *a priori* de todos los fenómenos en general, a saber, la condición inmediata de los internos (de nuestras almas) y, por ello mismo, también la condición mediata de los externos. Si puedo afirmar *a priori* que todos los fenómenos externos se hallan en el espacio y están determinados *a priori* según las relaciones espaciales, puedo igualmente afirmar en sentido completamente universal, partiendo del principio del sentido interno, que absolutamente todos los fenómenos, es decir, todos los objetos de los sentidos, se hallan en el tiempo y poseen necesariamente relaciones temporales”.

obtenemos una representación espacial de su forma, está condicionada por el espacio y por el tiempo: toda representación material, además de ser una percepción espacial, es, en tanto que una percepción, percibida como un suceso o una duración. De esta forma, gracias a esta relación entre el tiempo y el espacio, podemos tener percepción del movimiento: cuando tengo dos percepciones de un mismo objeto, ocupando dos lugares distintos en el espacio, sólo pueden ser percepciones sucesivas, y nunca simultáneas, lo cual significa que ha transcurrido tiempo. Por lo tanto, es posible definir el movimiento, y por contra el reposo, de un objeto de la siguiente manera:

“Aquí añadiré que el concepto de cambio, y con él el de movimiento (como cambio de lugar), sólo es posible en la representación del tiempo y a través de ella; igualmente, que si esta representación no fuese intuición (interna) *a priori*, no habría concepto alguno, fuese el que fuese, que hiciera comprensible la posibilidad de un cambio, es decir, de una conexión de predicados contradictoriamente opuestos en una misma cosa (por ejemplo, el que una misma cosa esté y no esté en el mismo lugar). Sólo en el tiempo, es decir, *sucesivamente*, pueden hallarse en una cosa las dos determinaciones contradictoriamente opuestas. Nuestro concepto de tiempo explica, pues, la posibilidad de tantos conocimientos sintéticos *a priori* como ofrece la teoría general del movimiento, que es bien fecunda”¹⁴.

Sin embargo, otra consecuencia se deriva de la relación entre espacio y tiempo, que es más importante. Para Kant, toda percepción externa se da en el espacio, por ello todo objeto material es una figura, una forma espacial, de ahí que el espacio sea la “forma de la intuición externa”; pero, como el espacio se reduce a tiempo, al ser percibido siempre como una sucesión temporal, el tiempo es también, no sólo forma de la intuición interna, sino además la forma de la intuición externa, junto con el espacio. De tal manera que si el tiempo es condición de toda sensibilidad, tanto interna como externa, y el espacio sólo lo es de la externa, entonces podremos reducir el espacio a tiempo y con ello la geometría a aritmética. Esto último es, desde Descartes, un hecho en la matemática: la geometría puede reducirse a aritmética porque a toda forma o figura geométrica le corresponde una ecuación numérica, o sistemas de ecuaciones que se construyen a partir de la determinación aritmética de los puntos que conforman la figura; ésta es la base de la geometría analítica, donde las figuras se traducen a números.

¹⁴ KANT, I., Crítica de la Razón Pura, p. 76 (B48-B49).

Ahora bien, cuál es el argumento de Kant para justificar esta correspondencia entre geometría y aritmética, entre figuras y números. Pues, precisamente, que las figuras se construyen a partir de la intuición espacial junto con la temporal y los números sólo a partir de la intuición temporal, de tal forma que a toda figura espacial le corresponde una serie temporal desde la que se determina las relaciones numéricas que los puntos de la figura mantienen entre sí; la intuición temporal es la más fundamental y por ello puede reducirse el espacio a tiempo y afirmar que siempre percibimos aquél en una sucesión temporal, en una serie de percepciones. De esta forma la intuición temporal es el elemento que mantienen en común ambas ramas de la matemática, haciendo de puente entre una y otra.

El carácter *trascendental*¹⁵ de estas dos intuiciones permite construir la matemática a la vez que descubrir las condiciones fundamentales de la realidad misma y con ello, Kant no sólo consigue dar validez a la matemática como ciencia sintética, sino que además explica por qué puede la matemática aplicarse a la realidad, dando lugar a la física, como ciencia exacta acerca de la realidad material (del mundo natural): el espacio y el tiempo no son, en la filosofía kantiana, meras formas subjetivas de nuestra capacidad de percibir, pues, además de pertenecer al ámbito psíquico del entendimiento humano, son propiedades de los objetos, propiedades objetivas y no sensaciones subjetivas; por lo tanto, todo cuerpo material y físico, perteneciente a la realidad objetiva, es susceptible de ser matematizado, pues espacio y tiempo son las condiciones de la matemática y de la realidad física¹⁶.

No obstante, recalaré en el hecho de que tales formas *a priori*, anteriores a la experiencia, no tienen un valor innato, ya que son anteriores a cualquier experiencia psíquica particular y concreta, pero nuestra mente los ha extraído de la experiencia general durante un proceso perceptivo originario de asociación de sensaciones. El carácter de *a priori* de las intuiciones no contradice el posible origen psicológico de éstas, incluida la

¹⁵ Recuérdese que Kant eligió el término “trascendental” para designar a aquello que es, a la vez, condición del conocimiento humano y condición del objeto extralingüístico, distinguiéndolo, así, del término “trascendente” como aquello que es, únicamente, condición del objeto sensible, el cual se contraponen a “inmanente” como aquello que es propio de nuestra capacidad de conocer y de percibir los objetos.

¹⁶ De nuevo he de volver a mencionar la diferencia entre Bohr y Kant, cuyas consecuencias desarrollaré más adelante: las ideas de Bohr no se ajustan al carácter *a priori* de la intuición pura, que defiende Kant; por ello, cuando Bohr habla de espacio y tiempo como “formas de intuición”, lo hace en un sentido mal empleado de la terminología kantiana, ya que no son “formas” sino, todo lo más, intuiciones empíricas.

espacialidad con su respectiva representación de la extensión, característica fundamental de la materia.

Es bien conocido que no hay contradicción porque Kant distingue entre el origen psicológico del acto particular de conocer y el fundamento gnoseológico del conocimiento mismo; de esta manera se explica el significado de la popular frase con la que Kant inició la “Crítica de la razón pura”: “*Pero si bien todo nuestro conocimiento comienza con la experiencia, no por eso se origina todo él de la experiencia*”; no todo él se fundamenta en ella. El significado de ésta depende de la distinción que hace Kant entre “comienzo” y “origen”, o fundamento, ya que cada término pertenece a dos puntos de vista distintos, el psicológico y el lógico: Kant no usa el término “origen” en su acepción de momento inicial de un proceso que sigue un orden cronológico, este significado de principio genético, o principio *de hecho*, se lo reserva a “comienzo”; el origen es un origen lógico, un principio *de derecho*, el fundamento lógico y la finalidad de algo, su razón de ser, su *condición a priori*, que nada tiene que ver con el innatismo¹⁷. De esta manera, es posible que la idea de esfera, por ejemplo, tenga su comienzo, u origen empírico, en nuestra experiencia de contemplar objetos con esta forma, como pueden ser las piedras redondeadas de un río; sin embargo, este conocimiento no tendría universalidad y necesidad, sólo sería conocimiento vulgar¹⁸. Para que éste adquiera precisión y sus conceptos posean validez científica, es necesario que tenga, además, un origen lógico, el cual se encarga de relacionar la idea de esfera con otras figuras ideales para que podamos *definir* la idea de este sólido de una manera necesaria y universal.

Esta *relación ideal* entre figuras nos viene posibilitada por el espacio, como intuición pura, que es el fundamento lógico, o intuitivo, de la geometría a pesar de que éste tenga su origen empírico en la asociación, en nuestra consciencia individual, de complejas sensaciones táctiles y visuales. Pero, por qué el espacio es el fundamento lógico de la geometría. Porque no existe ningún otro elemento *geométrico*, anterior a él, que sea capaz de explicarnos su naturaleza espacial; es decir, es la condición indispensable

¹⁷ La ciencia realiza síntesis *a priori* (universales y necesarias) que no se originan a partir de la sensación, sino de elementos *a priori* con carácter objetivo: son algo más que las condiciones de posibilidad del conocimiento, pues también son condiciones de posibilidad del objeto.

¹⁸ El conocimiento vulgar carece de la universalidad y necesidad del conocimiento científico porque aquél sólo puede referirse a acontecimientos particulares y concretos, en un “aquí” y “ahora”.

de este tipo de conocimiento, según la cual se hacen inteligibles todas las características geométricas de la materia: superficie, línea, volumen..., todos estos conceptos sólo adquieren sentido si los fundamentamos en la idea de espacio.

Por esto es condición de posibilidad de nuestro entendimiento y, ya que no podemos pensar ningún objeto material al margen del espacio, también es condición de posibilidad de éstos. Tanto es así que, para poder invertir internamente las partes de un sólido geométrico, tendríamos que sacarlo del espacio, llevándolo, quizás, a la cuarta dimensión, dado que, para invertir la simetría de una figura plana, o semiplana, es suficiente con levantarla y darle la vuelta, pero, para hacer esto, necesitamos, precisamente, llevarla a la tercera dimensión, la profundidad, a la cual el objeto plano no pertenece, al menos idealmente; del mismo modo, para invertir una figura de tres dimensiones, necesitaríamos “sacarlo” de su tridimensionalidad y, una vez llevado a la cuarta dimensión, el tiempo, lo encontraríamos privado de su espacialidad, algo que sólo la imaginación poética o literaria puede realizar¹⁹.

Esto es lo que afirma Kant, pero ¿aquella relación, que también defiende, entre tiempo y espacio, entre aritmética y geometría, acaso no

¹⁹ Este tipo de licencia artística, que convierte lo matemáticamente posible en físicamente posible, e incluso fáctico, es la base de la literatura fantástica y de Ciencia-Ficción. En uno de sus relatos fantásticos, H.G. Wells se sirvió de este tipo de imaginación para escribir “El caso Plattner”: tras la desaparición de Gottfried Plattner, profesor de escuela, cuando practicaba un experimento químico con una extraña sustancia, vuelve a aparecer con sus lados, izquierdo y derecho, intercambiados, el corazón a la derecha, el lóbulo izquierdo del hígado a la derecha y el derecho en su lado izquierdo, rasgos fisiológicos personales también intercambiados, etc. Este cuento relata la singular experiencia que vivió Plattner durante nueve días *fuera del espacio*, que es la única explicación *posible*, que incluso la licencia artística permite suponer, del hecho de que Plattner presentara la simetría de sus lados derecho e izquierdo transpuesta: “No hay forma de coger a un hombre y removerlo *en el espacio*, tal y como la gente corriente entiende el espacio, que dé por resultado el intercambio de sus lados. Hagáis lo que hagáis, el derecho sigue siendo el derecho y el izquierdo, el izquierdo. (...) Los teóricos matemáticos nos dicen que la única manera de intercambiar el lado derecho y el izquierdo de un cuerpo sólido es quitándolo limpiamente del espacio tal y como lo conocemos (es decir, quitándolo de una existencia ordinaria) y dándole la vuelta en alguna parte fuera del espacio. Esto es un poco abstruso, no hay duda, pero cualquiera que tenga los más mínimos conocimiento de la teoría matemática, puede garantizar al lector que es verdad. Por ponerlo en lenguaje técnico, la curiosa inversión de los lados derecho e izquierdo de Plattner es la prueba de que él se trasladó de nuestro espacio a lo que se denomina ‘cuarta dimensión’ y regresó de nuevo a nuestro mundo”. WELLS, H.G., “El caso Plattner”, pp. 96-97. En: “La Biblioteca de Babel, colección de lecturas fantásticas dirigida por Jorge Luis Borges, Ediciones Siruela, Madrid, 1984.

capacita al tiempo para ser también el fundamento mismo del espacio? De ser así el espacio perdería su carácter de intuición pura, como fundamento último de la geometría, irreductible a ningún otro elemento más simple. El problema está en que si no admitimos la intuición espacial, como forma *a priori*, no podemos dar el paso que dio Kant, en su *Análítica Trascendental*, para construir las categorías como condiciones de posibilidad del conocimiento físico y garantizar, así, los juicios sintéticos *a priori* en la Física, concretamente, en física clásica.

No obstante, dado que en este trabajo no comparto con Kant tal preocupación, no entraré en ella²⁰; me limitaré a su fundamentación de la Matemática y a aquellas otras propuestas que se basaron en ésta. De momento sólo podré concluir que el espacio como intuición pura no puede seguir manteniéndose, ya que el tiempo está capacitado para ser el fundamento del espacio, como se verá a continuación; pero, además, podrá comprobarse, siguiendo el siguiente epígrafe, si el tiempo puede seguir operando o no como intuición.

b) Tres programas de fundamentación de la matemática: la temporalidad

Kant defendió el espacio y el tiempo como condiciones de posibilidad del conocimiento y del objeto²¹; sin embargo, tal consideración del espacio como intuición pura se ha vuelto muy problemática hoy por hoy. De manera que, dentro del contexto intuicionista, la única base firme para garantizar la validez científica de una teoría, como la física cuántica, es la intuición temporal. A continuación expondré el trabajo de ciertos matemáticos que se esforzaron por encontrar un fundamento intuitivo para la Matemática, en el sentido kantiano; es decir, buscaron aquello que pudiera garantizar su validez y certeza, necesaria y universal²², como algo

²⁰ Actualmente hay muchos autores, kantianos, que subrayan la importancia de la intuición temporal no sólo en la construcción y fundamentación de la Matemática, sino también en todo el Idealismo Trascendental. Sin embargo, dejaré a ellos la tarea de encontrar la manera de “reconstruir” toda la Crítica de la Razón Pura a partir del tiempo como el *a priori* fundamental.

²¹ Adelantaré, a favor de la claridad, que para Bohr son tanto condiciones gnoseológicas de nuestra sensibilidad (experiencia y percepción) como condiciones del objeto, pero no condiciones *a priori* del conocimiento humano, como sí lo son en la filosofía de Kant.

²² El marco de la complementariedad no necesita este tipo de validez: una certeza necesaria y universal. Sólo necesita que se garantice la conexión de la teoría cuántica con el mundo o la realidad atómica.

más que un mero juego lógico sin ninguna relación con el mundo, la realidad. El punto de partida de muchos de ellos fue esta forma de intuición.

Al igual que en Física, con el surgimiento de la mecánica cuántica, en Matemáticas las geometrías no-euclídeas pusieron de manifiesto que el espacio gnoseológico (espacio como intuición pura y no empírica) falla como fundamento intuitivo del conocimiento²³. Por lo tanto, una fundamentación, que garantice la certeza matemática, se buscará o bien en la lógica, sin fundamento intuitivo alguno, o bien, exclusivamente, en la intuición temporal. El resultado de estos intentos se cristalizó, básicamente, en tres escuelas de pensamiento, cuyo contenido no puedo pasar por alto, aunque lo expondré con toda brevedad posible, porque en mi propuesta hay un recurso a uno de estos modelos gnoseológicos sobre la validez del conocimiento matemático.

Durante el período comprendido entre el último tercio del siglo XIX y el primero del siglo XX, se produjo una búsqueda frenética en torno a un programa de fundamentación de la Matemática, desde el que garantizar la certeza y la validez del conocimiento matemático como un saber de carácter necesario y universal. La mayoría de los pensadores, que protagonizaron esta aventura filosófica, fueron matemáticos que se adentraron en la filosofía, buscando sistemas que fortalecieran sus propias posturas: tales pesquisas arrancaron, por un lado, de la escuela logicista leibniziana y, por otro, de la intuicionista kantiana, dando como resultado tres grandes escuelas: logicismo, formalismo e intuicionismo.

El programa logicista de esta época sigue el camino marcado por el logicismo de Leibniz, cuyo dos máximos exponentes son Dedekind y Frege. Este último reunió una gran cohorte de seguidores, la cual fue encabezada por Russell y en torno a sus ideas crearon una poderosa escuela filosófica, el Positivismo Lógico, que tuvo su época de esplendor durante las tres primeras décadas del siglo XX. Este programa se caracteriza por el llamado “reduccionismo lógico”: la matemática se reduce a lógica. Sin embargo, tanto las propuestas de Dedekind como las de Frege se

²³ Nos falla porque ambas intuiciones no coinciden: esto es, el espacio gnoseológico como intuición pura o percepción a priori no se corresponde con el espacio atómico, pues éste tiene características distintas (“saltos cuánticos” en los cambios orbitales) a la del espacio euclídeo, que es el espacio que podemos *percibir e intuir* (aquél era, en física clásica, tanto intuición empírica como intuición pura). Sin embargo, precisamente, porque la geometría ha admitido la posibilidad de varios tipos de espacio, los cuales mantienen ciertos aspectos comunes, este fracaso del espacio euclídeo como intuición empírica no me parece un escollo insalvable a la hora de describir y representar el mundo atómico.

encontraron con las mismas dificultades a la hora de tratar con los conjuntos infinitos, a los que otorgaban el carácter de “naturaleza puramente lógica”. Con el objetivo de subsanar estas dificultades, Hilbert y Brouwer construyeron sus propios modelos de fundamentación de la matemática, el formalismo y el intuicionismo, respectivamente.

Primeramente, me detendré en el modelo logicista y antes de entrar de lleno en éste, he de destacar lo siguiente: las relaciones entre lógica y matemáticas salieron a la luz, durante la llamada “revolución del rigor”, a lo largo del siglo XIX, cuando se quiso fundamentar el carácter de aquella última independientemente de toda experiencia. En concreto, el objetivo se centró en buscar una fundamentación rigurosa del Análisis infinitesimal a través de la Aritmética y a partir de la Lógica; es decir, se buscaba aritmetizar el Análisis por medio de la Lógica.

De aquella forma, Dedekind pretenderá demostrar que la Aritmética y la Teoría de los Conjuntos Infinitos son una parte de la Lógica²⁴. Este planteamiento implica, o requiere, el siguiente postulado: los números y los conjuntos infinitos son creaciones libres del intelecto humano, objetos lógicos, que no guardan ninguna relación con las nociones de espacio y de tiempo²⁵. Esta fórmula antikantiana y de tradición leibniziana es el camino que emplea Dedekind para que la Aritmética se independice de toda experiencia, sosteniendo que el origen de la verdad matemática no está en la intuición (kantiana) sino en la Lógica, que es su garantía de certeza.

Más tarde, y a pesar del valor matemático que conservan algunas de las propuestas y construcciones teóricas de Dedekind, se explicitaron los supuestos que escondía su programa logicista de fundamentar la Aritmética

²⁴ Ideas que presentó en su trabajo de 1888, “Was sind und was sollen die Zahlen?”, Brunswick. Trad. inglesa, por W.W. Berman, “Essays on the theory of numbers”, Chicago, 1901 y reeditada en 1963 por Dover Pub. Inc.

²⁵ Cañón Loyes subraya que, al hablar de los números como creaciones libres de la mente, puede parecer que hay un acercamiento de posturas entre la corriente logicista y la intuicionista porque también en ésta se hablará de creaciones de la mente; pero no hay nada más lejos de la realidad porque dentro de la propuesta intuicionista “los números proceden de la intuición temporal y de las construcciones llevadas a cabo en el dominio más íntimo de la actividad humana, en el que no hay lugar para la lógica. En el planteamiento de Dedekind ya hemos visto cómo las construcciones propuestas son posibles sólo porque las leyes del pensamiento las regulan. Es decir, son ellos mismos objetos lógicos”. CAÑÓN LOYES, C., La Matemática. Creación y descubrimiento. Universidad Pontificia Comillas (UPCO), Madrid, 1993, p. 212.

en la Lógica y se demostró que era insostenible²⁶. Frege realizará el mismo intento pero por otro camino, a lo cual añadió la tarea de expresar su teoría en un lenguaje formalmente construido. Frege rivalizó con Kant en relación con la naturaleza de las verdades de la Aritmética: el primero creía que tales proposiciones debían tener una validez universal y necesaria sólo por ser juicios analíticos y no sintéticos a priori.

A esta creencia epistemológica le suma una concepción trascendental de la lógica, la cual es capaz de garantizar el carácter de universalidad y necesidad de las proposiciones aritméticas sin tener que convertirlas en juicios sintéticos a priori²⁷.

El programa de Frege consta de tres etapas: la primera consiste en construir un lenguaje formal inequívoco que posibilite los dos pasos siguientes, relacionados con las dos operaciones fundamentales de la Aritmética, definir y deducir; la segunda pretende demostrar que las definiciones de los conceptos básicos de la Aritmética se pueden reducir a nociones lógicas, de tal forma que la noción de número y de conjunto pueda concebirse como la extensión (referencia) de un concepto; la tercera ha de lograr probar, basándose en la noción de número asociada a la de concepto, que toda demostración matemática de la Aritmética puede expresarse como deducciones lógicas.

No obstante, para concluir este programa ha de atribuir un carácter estrictamente lógico a la noción de conjunto, tratamiento que provoca la “Paradoja de Russell”, en relación con esta concepción logicista e ingenua

²⁶ La explicación de esto puede encontrarse en las tres obras siguientes: GILLIES, D.A., Frege, Dedekind and Peano, on the Foundations of Arithmetic, Asses: van Gorcum, 1982, pp. 60 y ss. CAÑÓN LOYES, C., La Matemática. Creación y descubrimiento. Universidad Pontificia Comillas (UPCO), Madrid, 1993, pp. 207-208. KLEENE, S.C., Introducción a la metamatemática, pp. 49-51. Por ejemplo, este último sentencia, en la página 51, que “la tesis logicista puede ser, finalmente, cuestionada sobre la base de que la lógica presupone ya ideas matemáticas en su formulación. Desde el punto de vista intuicionista hay ya contenido un esencial núcleo matemático en la idea de iteración, que precisa ser utilizada, p.ej., al describir la jerarquía de tipos, o la noción de una deducción a partir de premisas dadas”.

²⁷ Tal concepción le lleva a “concebir un reino de objetos, de cierto corte platónico, distinto del mundo sensible y del mundo mental. Él lo llamará «tercer reino» y está constituido por lo que él denominará «pensamientos». Los pensamientos, en este sentido fregeano, no se producen, se captan. Por ello, el trabajo de la ciencia, de la Matemática en particular, consiste no en crear, sino en descubrir pensamientos verdaderos. La verdad correspondiente es independiente del tiempo y del sujeto que la descubre, y la lógica se ocupa de descubrir las leyes que rigen el entramado de pensamientos verdaderos”. CAÑÓN LOYES, C., La Matemática. Creación y descubrimiento. Universidad Pontificia Comillas (UPCO), Madrid, 1993, pp. 213-214.

de los conjuntos, de cuyo fallo es responsable la interpretación “actualista” del infinito, en la matemática clásica, como algo *actual, completo y cerrado*. De esta forma, la propuesta logicista cae sobre sus propios pilares lógicos, abriendo una brecha por la que volvió a entrar el problema de la fundamentación de la Matemática. Los constructivistas que, entonces, surgieron, como Kronecker, Poincaré, Brouwer y Weyl, partieron de premisas intuicionistas para elaborar una interpretación “constructivista” del infinito en matemáticas distinta de la “actualista”, con lo cual no tuvieron que enfrentarse con la anterior paradoja porque tal interpretación la disuelve²⁸: el infinito es sólo algo *potencial, en construcción* y siempre *abierto* en posibilidades.

En definitiva, y de acuerdo con la conclusión de Kleene, para solucionar el tema de las paradojas, el primer paso que se ha de dar es construir una teoría axiomática de conjuntos, donde no sólo dispongamos de una definición de conjunto, sino además de teoremas sobre todos los conjuntos; pero esta axiomatización no es suficiente porque aún siguen apareciendo contradicciones y problemas, que al resolverse suscitan otros.

Por lo tanto, o bien se ha cometido alguna falacia lógica, o bien algún error en la construcción y aplicación de la Teoría de Conjuntos, donde culminaron la Aritmética y el Análisis, a los sistemas de objetos matemáticos, con lo cual se ha de distinguir en Matemáticas entre un nivel formal y otro “real”, en el cual la verdad y la falsedad tengan sentido. Por esta razón, Kleene afirma lo siguiente:

“Decir que esas materias -se refiere a la Aritmética y al Análisis- deberían en cambio ser establecidas ahora sobre una base axiomática no releva sin más del problema. Después de la axiomatización ha de haber todavía algún nivel en el que tengamos verdad y falsedad. Si la axiomática es informal, los axiomas han de ser verdaderos. Si la axiomática es formal, hemos de creer, al menos, que los teoremas se siguen de los axiomas; como también que ha de darse alguna relación entre esos resultados y cierta realidad fuera de la teoría axiomática, si es que la actividad del matemático no ha de reducirse a un sinsentido. Las proposiciones formalmente axiomatizadas de la matemática no pueden constituir la totalidad de la matemática: ha de haber también una matemática intuitivamente entendida. Si hemos de abandonar nuestra

²⁸ Cf. KLEENE, S.C., Introducción a la metamatemática, pp. 43-49, donde se refiere a este tipo de paradojas, desde la de Epiménides hasta la de Richard, pasando por la de Russell, Cantor y Burali-Forti. También en: CAÑÓN LOYES, C., La Matemática. Creación y descubrimiento. Universidad Pontificia Comillas (UPCO), Madrid, 1993, pp. 222-223.

anterior creencia de que ésta comprende la totalidad de la aritmética, el análisis y la teoría de conjuntos, no quedaremos enteramente satisfechos hasta tanto no hayamos descubierto en dónde erró nuestra creencia y dónde hemos de trazar ahora, en cambio, una línea de separación”²⁹.

Empezaré exponiendo la solución de Brouwer. Ya he dicho que, debido a la aparición de paradojas, el programa logicista pierde la consistencia lógica que él mismo había propuesto como fundamento de la Matemática: al volverse inconsistente, se incapacita a sí mismo para servir de garantía a la Matemática; Brouwer niega, entonces, que el fundamento de ésta sea de naturaleza lógica y pone en el lugar de ésta a la intuición, la cual permite disponer de una nueva concepción de infinito³⁰.

Brouwer propone que la exactitud de la matemática, en toda su extensión, incluido el análisis, es independiente de la lógica y del lenguaje³¹. A partir de esta creencia, desde la que se plantea que los teoremas matemáticos se elaboran desde una “construcción introspectiva”, Brouwer lanza su propuesta de una matemática intuicionista, que se cristaliza en torno a los dos siguientes puntos:

“1. Separa la matemática del lenguaje matemático, en particular los fenómenos del lenguaje descritos por medio de la lógica. Reconoce así la matemática como una actividad a-lingüística. Es una actividad de la

²⁹ KLEENE, S.C., Introducción a la metamatemática, pp. 47-48. A lo cual concluye así: “El problema inmediato de eliminar las paradojas se diluye así en el problema más amplio de la fundamentación de la matemática y la lógica. ¿Cuál es la naturaleza de la verdad matemática? ¿Qué significado tienen las proposiciones matemáticas, y en qué evidencia reposan? Este vasto problema, o complejo problema, existe para la filosofía aparte de la circunstancia de que hayan surgido las paradojas en los linderos de la matemática. Históricamente, esta circunstancia ha conducido, por parte de los matemáticos, a un estudio del problema más intenso de lo que, verosimilmente, hubiera tenido lugar en otro caso; y es obvio que las paradojas imponen condiciones a la solución de tal problema”. *Ibid.*

³⁰ Pero sus ideas tan extremas como constructivista le abocaron, inevitablemente, a un solipsismo del que no se puede escapar. Por ello, Hilbert defenderá una solución intermedia para evitar caer en los errores de uno y de otro: ni el logicismo ni el intuicionismo de Brouwer pueden delimitar el alcance de su programa formalista.

³¹ “Sin embargo, estos autores -se refiere a los pre-intuicionistas- sólo hacen extensiva su posición al dominio de la Aritmética. El continuo y con él todo el análisis lo tratan con el instrumental propio de la lógica clásica, en concreto, hacen uso de la ley de tercio excluso para los teoremas de existencia”. CAÑÓN LOYES, C., La Matemática. Creación y descubrimiento. Universidad Pontificia Comillas (UPCO), Madrid, 1993, p. 243.

mente cuyo origen está en la percepción del movimiento del tiempo. Ahí radica la intuición de la Matemática.

2. Reconoce la posibilidad de generar nuevas entidades matemáticas. En primer lugar, entidades de la forma de sucesiones infinitas que se generan a partir de entidades matemáticas puramente construidas. Y en segundo lugar, en la forma de «especies matemáticas» (propiedades atribuibles a entidades matemáticas previamente adquiridas, que satisfacen la condición de que si valen para ciertas entidades matemáticas, valen también para todas las relacionadas con ellas mediante una relación de equivalencia).

Esta segunda acción del intuicionismo posibilita la introducción del continuo como un objeto matemático. Y con ello, salvar la dificultad encontrada por los pre-intuicionistas. El programa de Brouwer se asienta así sobre la creencia epistemológica de la exactitud de una matemática concebida como ciencia de los números, exactitud que emana de la intuición temporal kantiana³².

Su propuesta intuicionista es la siguiente: en su lección inaugural, Brouwer ya afirma que la *intuición temporal* es el «fenómeno fundamental del pensamiento matemático» y, a partir de ella, nuestro intelecto construye toda la Matemática; por lo tanto, su fundamento está en el entendimiento humano, pero no en la lógica, sino en la intuición íntima del transcurso del tiempo, desde la cual elaboramos las construcciones matemáticas³³. Esto lo realiza demostrando que todas las ciencias dependen de aquella, incluso la lógica, al mismo tiempo que prueba la independencia de la Matemática respecto a ellas: reduce la causalidad, como repetición de secuencias, al número y revela el uso de la “repetición” también en los conceptos atómicos con los que trabajan los logicistas³⁴. De tal forma que:

“Esta intuición temporal primordial además de generar los «números naturales» une en ella lo continuo y lo discreto, da origen inmediatamente a la intuición del continuo lineal, del «entre». Pero no sólo las propiedades de la Aritmética están cualificadas por ella como juicios sintéticos a priori. Para Brouwer, también cualifica de este modo

³² CAÑÓN LOYES, C., La Matemática. Creación y descubrimiento. Universidad Pontificia Comillas (UPCO), Madrid, 1993, pp. 244-245.

³³ Es importante probar la suficiencia de esta intuición porque el a priori kantiano del espacio falló, como fundamento de aquella, cuando se descubrieron las geometrías no euclídeas.

³⁴ Cf. STIGT, W.P.van: Brouwer intuitionism, Ph. D. University, London, 1971, pp. 84-86.

a los de la geometría, pues «desde Descartes hemos aprendido a reducir todas las geometrías a Aritmética por medio del cálculo de coordenadas»³⁵.

Esta intuición permite concebir el infinito, y con él la totalidad de todos los conjuntos, no como algo con una existencia completa y actual, sino como una serie indefinida y abierta en potencialidades, con la cual se resuelven las paradojas del logicismo. La paradoja de Russell, de raíces cantorianas, puso de manifiesto que la interpretación “actualista” del infinito en matemáticas supone la antinomia (aporía) del conjunto de todos los conjuntos cuando se lo considera un nuevo conjunto, el cual si no cabe dentro de sí mismo entonces no abarca a “todos los conjuntos”.

La interpretación “constructivista”, de raíces kantianas porque fundamenta la matemática en la intuición a priori del tiempo, hace imposible hablar de la totalidad de todos los conjuntos como un conjunto nuevo, evitando, así, la aporía. Para ello, se ha de construir un proceso que genere una jerarquía de conjuntos, partiendo del vacío, considerado como un conjunto, y construyendo desde él todos los conjuntos posibles, los cuales han de cumplir una condición: todo conjunto ha de ser un subconjunto de otro ya construido.

De esta forma, en la teoría de conjuntos de Von Neumann-Gödel se distingue entre clases y conjuntos, como órdenes distintos, siendo la totalidad de los conjuntos una clase y no un conjunto. Esta solución se hizo posible porque dentro de dicha interpretación no es lícito considerar la totalidad de todos los conjuntos como “actualmente existente” porque lo infinito no puede considerarse como completo sino como un proceso siempre abierto, siempre en constante construcción. Sin embargo, se encontraron con otro problema, ahora, en relación con las proposiciones existenciales y la “ley del tercero excluido”.

Dicho en pocas palabras, este problema arranca del siguiente hecho. La interpretación actualista ofrece demostraciones indirectas de existencia, que se realizan por el método de reducción al absurdo: se comienza negando aquello que queremos afirmar para demostrar que su negación conduce a una contradicción en la conclusión (A y no A); de esta forma realizaban tales demostraciones sobre dominios infinitos, como lo hacían con los finitos, pero suponiendo que el *infinito* tenía una *existencia*

³⁵ CAÑÓN LOYES, C., La Matemática. Creación y descubrimiento. Universidad Pontificia Comillas (UPCO), Madrid, 1993, pp. 250-251.

actual o completa como un conjunto cerrado³⁶. Sin embargo, este tipo de demostraciones no es aceptado por los constructivistas porque supone la validez de la “ley de tercero excluido” (o A o no A) en las series infinitas, la cual es considerada, por algunos de ellos tan radicales como Brouwer, como una extrapolación ilícita desde el dominio de las magnitudes finitas, donde surgió, a dominios infinitos, lo cual la convierte en responsable de círculos viciosos y confusiones dentro del Análisis: si la serie es algo indefinido e inacabado y en constante construcción, no podemos aplicar una relación de exclusión lógica sin que surjan ambigüedades y paradojas lógicas³⁷.

De tal manera que la interpretación del “infinito potencial” de los constructivistas entra en contradicción con la ley del tercero excluido, al no admitir su aplicación en los dominios infinitos, a la cual se tuvo que renunciar para desvalorizar, antes que resolver, tales problemas; pero, renunciar a esta ley supone la renuncia a muchos de los logros clásicos que ayudó a alcanzar, convirtiendo en problemáticos estos aspectos de la Matemática que hasta entonces no habían planteado ninguna dificultad. Entre ellos está incluido el problema de cómo demostrar las proposiciones de existencia, las cuales quedan reducidas a enunciados hipotéticos³⁸, ya

³⁶ “En la matemática clásica ocurren demostraciones *no-constructivas* o *indirectas* de existencia, que los intuicionistas no aceptan. Por ejemplo, para demostrar *existe un n tal que $P(n)$* , el matemático clásico puede deducir una contradicción de la suposición *para todo n , no $P(n)$* . Lo mismo para la lógica clásica que para la intuicionista, ello da, por reducio ad absurdum, *no para todo n , no $P(n)$* . La lógica clásica permite que este resultado sea transformado en *existe un n tal que $P(n)$* , pero no (en general) la intuicionista. Una tal demostración clásica de existencia no nos deja más cerca de tener un ejemplo de un número n tal que $P(n)$ de lo que estábamos antes de haberla comenzado (aunque a veces podemos quedar después en disposición de descubrir un tal número por otro método). El intuicionista se guarda de aceptar semejante demostración de existencia, puesto que la conclusión de la misma, *existe un n tal que $P(n)$* , no puede tener para él otro significado que el de ser una referencia a un ejemplo de un número n tal que $P(n)$, y este ejemplo no ha sido producido. El significado clásico, según el cual en algún lugar de la infinita totalidad completa de los números naturales ocurre un n tal que $P(n)$, no es aceptable para el intuicionista, puesto que no concibe a los números naturales como una totalidad completa”. KLEENE, S.C., Introducción a la metamatemática, p. 54.

³⁷ Cf. KLEENE, S.C., Introducción a la metamatemática, pp. 52-56.

³⁸ “Un enunciado general, *todo número natural n tiene la propiedad P* , o, más brevemente, *para todo n , $P(n)$* , es entendido por el intuicionista como una aserción hipotética al efecto de que, si cualquier número particular n nos fuese dado, podríamos estar seguros de que ese número n tiene la propiedad P . Este es un significado que no requiere tomar en consideración la clásica infinitud completa de los números naturales. (...) Un enunciado de existencia ... tiene para el intuicionista el significado de una comunicación parcial (o

que Brouwer no puede admitir demostración matemática alguna basada en principios filosóficos o lógicos, por lo cual no ha de haber, dentro de la matemática intuicionista, normas fijas para realizar inferencias; sólo podemos realizar inferencias singulares y particulares, cuya comprobación es inmediata y “evidente”.

Esta evidencia nos la ofrece la facultad intelectual de la intuición, como única “fuente de la matemática”, la cual garantiza la regularidad con la que se suceden las inferencias particulares y los conceptos matemáticos³⁹.

He aquí el punto donde divergen las dos grandes escuelas, formalismo e intuicionismo: Brouwer rechaza el empleo de la “ley del tercio excluido” para dominios infinitos y con él todas las demostraciones de existencia y todos los resultados que suponen su validez; Hilbert mantiene su empleo, para hacer posible una formalización de la Matemática, aunque con algunas reservas y proponiéndose remediar los problemas que esto suscita, a través de un gran proyecto de axiomatización de toda la matemática clásica y demostrando su consistencia.

La solución de Hilbert al problema de la fundamentación, parte de una propuesta que él mismo llamó el “método de los elementos ideales”. Con este método pretendía superar las paradojas, que la lógica clásica había introducido en su programa de formalización, distinguiendo entre dos niveles matemáticos para conservar la validez de aquélla en el “nivel formal” y, así, poder disponer de un punto de partida en su axiomatización. Para ello, distingue entre las *proposiciones finitistas* y las *proposiciones ideales*.

Las primeras son las llamadas “proposiciones reales” que componen las verdades de contenido o significativas y que surgen del *razonamiento finitista*, es decir, “el razonamiento directo, informal, libre de supuestos axiomáticos, tal como es llevado a cabo en los experimentos mentales en

abstracta) de un enunciado que suministra un ejemplo particular de un número natural n que tiene la propiedad P , o al menos suministra un método por el cual podría hallarse, en principio, un tal ejemplo”. KLEENE, S.C., *Introducción a la metamatemática*, p. 54.

³⁹ Por ejemplo: “La idea de la serie de números naturales puede ser analizada tomando como base la posibilidad, en primer lugar, de considerar un objeto o experiencia como algo que nos es dado separadamente del resto del universo, en segundo lugar, de distinguir ese objeto o experiencia respecto de cualquier otro, y en tercer lugar, de imaginar una repetición ilimitada del segundo proceso”. KLEENE, S.C., *Introducción a la metamatemática*, pp. 55-56.

términos de objetos concebidos intuitivamente”⁴⁰. En cuanto a las segundas, son aquellas que resultan de un proceso de transformación de un sistema de verdades intuitivas en un sistema ideal de fórmulas, donde han perdido todo su significado y sólo están gobernadas por reglas;⁴¹ de tal forma que “la existencia de un objeto matemático queda garantizada por la mera consistencia de los axiomas que lo introducen”⁴². Estas proposiciones son los elementos ideales de la teoría, que toman la forma de axiomas y que, por estar vacías de contenido, permiten la existencia de un *infinito actual*, el cual tiene un uso ilegítimo, únicamente, cuando manejamos proposiciones matemáticas con contenido⁴³. Por esto, dice Hilbert:

“... la inferencia lógica con contenido es indispensable. Nos ha engañado solamente cuando hemos aceptado condiciones abstractas arbitrarias, en particular aquellas bajo las cuales son subsumidos objetos en número infinito. Lo que hicimos entonces fue usar la inferencia con contenido de un modo ilegítimo, es decir, obviamente no respetamos las condiciones necesarias para el uso de la inferencia lógica con contenido. Y al reconocer que tales condiciones existen y deben ser respetadas nos encontramos a nosotros mismos de acuerdo con los filósofos, especialmente con Kant. Kant ya había enseñado (...) que la matemática dispone de un contenido asegurado independientemente de toda lógica y por tanto nunca puede ser provista de un fundamento por medio de la sola lógica; es por esto por lo que los esfuerzos de Frege y Dedekind estaban abocados a fallar. Más bien, algo debe ser dado en nuestra facultad de representación como condición para el uso de las inferencias

⁴⁰ HILBERT, D./BERNAYS, P., *Grundlagen der Mathematik*, I-II, Springer Verlag, Berlín, 1934-1939, p. 32. Citado en: CAÑÓN LOYES, C., *La Matemática. Creación y descubrimiento*, p. 226.

⁴¹ Esta propuesta de Hilbert puede resultar esclarecedora de la situación de la física actual y ello será lo que argumente más adelante, pues sus “proposiciones ideales” se corresponden no sólo con los sistemas matemáticos de fórmulas, sino también con las expresiones matemáticas del formalismo cuántico, y las “proposiciones reales” con aquellas que dicha física necesita para expresar en lenguaje cualitativo (no matemático) el contenido de sus expresiones matemáticas, es decir, para expresar la interpretación del formalismo.

⁴² CAÑÓN LOYES, C., *La Matemática. Creación y descubrimiento*, p. 228.

⁴³ “Los *enunciados reales* son aquellos cuyo uso entraña que tienen un significado intuitivo; *enunciados ideales* son aquellos cuyo uso no es tal. Los enunciados que corresponden al tratamiento del infinito en tanto que actual son ideales. La matemática clásica añade los enunciados ideales a los reales, al objeto de retener las sencillas reglas de la lógica aristotélica en el razonamiento acerca de conjuntos infinitos”. KLEENE, S.C., *Introducción a la metamatemática*, p. 59.

lógicas y de las operaciones lógicas, ciertos objetos concretos extralógicos que están intuitivamente presentes como experiencia inmediata anterior a todo pensamiento...”⁴⁴.

La propuesta de Hilbert es mantener una posición intermedia entre el intuicionismo, verdades matemáticas con contenido, y el logicismo, ya que este último permite disponer de un sistema abstracto de axiomas que da cabida al concepto de “infinito actual”. Para que Hilbert pueda reconciliar las leyes de la lógica clásica, cuya presencia es lícita en la interpretación actualista, con un planteamiento como el suyo, ha de hacer una distinción entre el “infinito potencial”, con el que trabaja la interpretación constructivista, y el “infinito actual”, que vuelve a adquirir el sentido de una entidad completa, actualmente dada, como, por ejemplo, la totalidad de los números enteros: 1, 2, 3, 4, etc.

Aunque la reintroduce en su planteamiento como una noción con sentido formal, no real, pero con ella que se resuelven las ambigüedades y las paradojas que, por un lado, la presencia de la *ley del tercero excluso* introduce en los dominios infinitos del Análisis cuando partimos de la concepción del “infinito potencial”, y, por otro lado, sin tener que renunciar a esta perspectiva constructivista del infinito, que el intuicionismo facilita, ya que con ella se resuelven las paradojas que la interpretación actualista, propia del logicismo, introduce en la teoría de conjuntos cantoriana y, de manera general, en todas sus extrapolaciones a dominios infinitos cuando nos situamos en el *nivel real* de las *matemáticas aplicadas*.

Por esta razón, Hilbert critica el recurso al mundo físico, el que percibimos, para construir modelos matemáticos, como muestra de su rechazo a la interpretación actualista del infinito en la aplicación ilimitada, que los logicistas hacían de ella⁴⁵. No obstante, a pesar de su éxito al

⁴⁴ HILBERT, D., “Über das Unendliche”, *Mathematische Annalen*, 95, 161-190. Citado en: CAÑÓN LOYES, C., *La Matemática. Creación y descubrimiento*, p. 227.

⁴⁵ Cf. HILBERT, D./BERNAYS, P., *Grundlagen der Mathematik*, (1934), vol. 1, Berlín (Springer), xii + 471 págs, pp. 15-17. “Dichos autores –explica Kleene– ilustran tal imposibilidad considerando la primera paradoja de Zenón (siglo quinto a. C.), según la cual un corredor no puede realizar su carrera en un tiempo finito. Porque antes de que pueda hacerlo, tendrá que cubrir la primera mitad de su carrera, luego el siguiente cuarto, después el octavo siguiente, y así sucesivamente. Pero esto requeriría de él que completase un número infinito de actos. La solución usual de la paradoja consiste en observar que la serie infinita de intervalos de tiempo requerida para recorrer los sucesivos segmentos, converge. «De hecho hay también una solución mucho más radical de la paradoja. Consiste en considerar que en modo alguno estamos obligados a creer que la representación matemático espacio-temporal del movimiento sea físicamente significativa para intervalos de espacio y

eliminar las paradojas que introdujo tal interpretación, el rechazo al fundamento empírico originará un problema, que los logicistas no tenían, en el campo de la aplicación física de las matemáticas, en el cual me detendré más adelante.

Este programa suyo se denominará “formalismo” porque la tarea que ha de realizar, para llevarlo a cabo, es una formalización, o axiomatización, de las matemáticas, desde cuyo nivel formal se pueda trabajar con el infinito actual y no sólo con el infinito potencial, de los constructivistas, con el objetivo, ya mencionado, de salvar las paradojas de la matemática clásica; por este motivo su teoría metamatemática pretende tratar a la matemática clásica como un sistema de teorías axiomáticas, expresadas en un lenguaje formal y consistentes entre sí. No obstante, Hilbert no renunciará a ese otro nivel, el de las proposiciones reales, el de las verdades con contenido, que estipulan unas determinadas condiciones, que, como el mismo Hilbert expresa en el fragmento que he citado, han de ser las condiciones kantianas. Tales condiciones implican un *compromiso ontológico* por parte de la teoría de Hilbert que le aparta radicalmente de Frege, a pesar de que empleara el cálculo de predicados, hecho por éste, para construir axiomáticamente las teorías de la matemática.

El reduccionismo lógico de Frege choca frontalmente contra la postura que mantuvo Hilbert: para éste, las matemáticas se expresan con un lenguaje formalmente construido, donde la axiomatización se realiza desde otro nivel, el de la metamatemática, pero aquéllas tienen un significado ontológico, una base ontológica, que va más allá de tal formalismo⁴⁶.

tiempo arbitrariamente pequeños; sino que más bien tenemos fundadas bases para suponer que ese modelo matemático extrapola los hechos de un cierto ámbito de experiencia (a saber, los movimientos dentro de los órdenes de magnitud hasta el presente accesibles a nuestra observación) en el sentido de una simple construcción conceptual, de modo similar a aquél según el cual la mecánica del continuo lleva a cabo una extrapolación consistente en suponer que la materia ocupa el espacio de una forma continua... La situación es análoga en todos aquellos casos en que se cree posible exhibir directamente un infinito (actual) en tanto que dado por la experiencia o la percepción... Un examen más detenido mostrará entonces que un infinito no se nos da realmente en absoluto, sino que es primero interpolado o extrapolado mediante un proceso intelectual». KLEENE, S.C., Introducción a la metamatemática, pp. 58-59.

⁴⁶ “La perspectiva hilbertiana, por otra parte, contempla los signos del lenguaje formal como las piedras de construcción de un edificio, del edificio de las matemáticas, cuya argamasa consiste en las leyes de la lógica aristotélica, y cuyos cimientos están dados al entendimiento a la manera kantiana. (...) Pero este lenguaje amasado por las leyes de la lógica goza de una propiedad extraordinariamente fuerte, su capacidad de crear un «ámbito ontológico» propio para esos objetos ideales, que hace posible los resultados matemáticos en los que interviene el infinito actual. (...) Este planteamiento ha llevado a una situación en

Dicho de otro modo, las matemáticas se expresan y se construyen mediante un lenguaje formalizado, pero esta formalización matemática arranca de las intuiciones kantianas, como formas de nuestro entendimiento, que son las que permiten a la matemática disponer de una base ontológica sobre la que erigir todo el proceso posterior de formalización.

No obstante, el camino que sigue Hilbert no es, ciertamente, tan directo como puede deducirse de las afirmaciones anteriores. Frege parte del reconocimiento de un mundo objetivo conceptual, que es el que impone al lenguaje formal cuándo un objeto cae dentro de un concepto o no; para Hilbert, esto sólo se decide desde su propia consistencia interna, es decir, si los axiomas que definen el concepto están libres de contradicción o no, dado que Hilbert concede al proceso de definición matemática, del lenguaje formal, un poder creativo regido por las leyes lógicas⁴⁷. Puesto que, a la hora de dar la definición de un concepto, nos hemos situado en el nivel metamatemático, donde la referencia de los símbolos matemáticos son objetos ideales, otros entes matemáticos que forman su propio mundo autónomo, y no objetos del mundo real:

“El reino de objetos ideales construidos por medio del lenguaje formal y las leyes de la lógica es un universo de entidades con leyes propias sujetas únicamente a la exigencia de la consistencia interna. La relación de los objetos de ese universo con los objetos del mundo real es un problema aparte, y en cuyo planteamiento intervendrá la cuestión acerca de la verdad”⁴⁸.

Por lo tanto, Hilbert defiende que los axiomas sólo tienen un significado ideal, pues la verdad y la falsedad sólo se predica de sus interpretaciones, las cuales se realizan en el nivel de las proposiciones

la que los objetos matemáticos sólo pueden expresarse en lenguaje formal matemático. Y para ello se dispone de una teoría formalmente potente, la teoría de conjuntos. Los sistemas de axiomas de la teoría de conjuntos proporcionan precisamente el sistema de supuestos formales acerca del universo de los objetos matemáticos”. CAÑÓN LOYES, C., La Matemática. Creación y descubrimiento. Universidad Pontificia Comillas (UPCO), Madrid, 1993, p. 235.

⁴⁷ De ahí que la verdad de los axiomas, que para Hilbert han sido elegidos arbitrariamente, sólo se establezca a partir de su consistencia interna, esto es, si no se contradicen los unos a los otros. Éste es su criterio de verdad y de existencia porque si son verdaderos, entonces los objetos, definidos por los axiomas, existen.

⁴⁸ CAÑÓN LOYES, C., La Matemática. Creación y descubrimiento. Universidad Pontificia Comillas (UPCO), Madrid, 1993, p. 237.

reales, y no de los axiomas, que ya han perdido su valor de copias de la realidad; no obstante, la matemática y la naturaleza siguen conectadas, aunque podamos construir la matemática independientemente de la naturaleza, de aquí la arbitrariedad de sus axiomas.

“Pero esta separación conlleva, como de hecho estamos haciendo al expresarla, una clara diferenciación entre las nociones de verdad y validez. El postulado de las paralelas es consistente con los otros cuatro, tiene una interpretación el espacio euclídeo que les hace verdaderos a los cinco. Pero no es una fórmula válida universalmente, pues, los otros cuatro tienen al menos un modelo en común en el que la interpretación del postulado de las paralelas es falso. De este modo el argumento de Frege que citábamos arriba aunque correcto, «un axioma no puede ser falso», sin embargo, es insuficiente. Verdadero o falso ya no se predica de los axiomas, sino de sus interpretaciones. El considerarlos como verdades absolutas responde a una concepción de los axiomas como copias fieles de una naturaleza consistente o como expresiones dadas en una intuición a priori con las que la realidad había de conformarse. El desarrollo de la matemática fregueana se sitúa en esta perspectiva vieja. La matemática de Hilbert se abre a un horizonte en el que matemática y naturaleza están íntimamente conectadas, pero aquella no se deja imponer las leyes por ésta para su propio desarrollo interno. Las leyes que reconoce son las de la lógica y junto a ellas los criterios propios de la estética. La lógica sola no fundamenta; la simplicidad, la elegancia, la armonía, aportan la confianza que la indeterminación inherente a los sistemas formales, hace imprescindible para continuar construyendo el edificio”⁴⁹.

Tal postura recupera la libertad, perdida por la propuesta intuicionista de Brouwer, para axiomatizar la matemática y construir nuevos teoremas sin la limitación que la naturaleza impone con su realidad fáctica. Como, de hecho, ocurre en física cuántica; es decir, las paradojas conceptuales del nivel epistemológico no afectan al desarrollo matemático de la teoría. De esta forma, podría afirmarse que la situación actual a la que nos ha llevado la física cuántica corrobora esta tesis de Hilbert y refuta la que defendió Brouwer.

No obstante, aunque por su parte, Brouwer nunca pretendió formalizar, a través de una lógica intuicionista, el lenguaje matemático, sí hubo varios intentos intuicionistas: los dos primeros fueron el de Heyting,

⁴⁹ CAÑÓN LOYES, C., La Matemática. Creación y descubrimiento. Universidad Pontificia Comillas (UPCO), Madrid, 1993, pp. 242.

colaborador de Brouwer, y el de Givenko, ambos realizados en 1928. De la formulación que desarrolló este último a partir de axiomas y supuestos intuicionistas, todos ellos aceptables para Brouwer, se pudo obtener el cálculo clásico de proposiciones con sólo añadir la ley de tercio excluso. La reacción de Brouwer fue negativa pues no compartía con Heyting la convicción de éste acerca de las grandes ventajas que tiene la formalización, al menos a la hora de transmitir el conocimiento matemático. Esta postura sí fue secundada por Gentzen y por Kleene, incluso Gödel hizo aportaciones al “establecimiento de relaciones entre la lógica propia de las matemáticas clásicas y la propia de las matemáticas intuicionistas” con el objeto de que “las matemáticas formadas en la tradición clásica, accedan a la matemática hecha desde supuestos intuicionistas”⁵⁰.

De esta forma, el programa intuicionista ha dado lugar a varias propuestas constructivistas. Autores posteriores, como E. Bishop y P. Lorenzen, desarrollaron durante la década de los años sesenta programas constructivistas que se apartan del solipsismo místico en el que cae el intuicionismo de Brouwer: el constructivismo de Bishop arranca de una interpretación intuicionista de los conectivos lógicos, la conjunción, disyunción e implicación y sólo acepta, al igual que Brouwer, demostraciones constructivas de existencia; pero, entenderá como construcción una evidencia computacional y no la construcción mental solipsística de Brouwer. El camino que recorre Lorenzen se aparta aún más del intuicionismo hasta el punto de considerar que el lenguaje y la lógica son elementos primarios de la construcción matemática, lo cual le deja fuera del constructivismo intuicionista.

En conclusión, el intuicionismo y el formalismo comparten el mismo objetivo, que es demostrar el carácter no empírico de la Matemática. Dice Brouwer: «*la matemática es una creación libre, independiente de la experiencia, que se desarrolla a partir de una única intuición primordial a priori*»⁵¹. No obstante, difiere de los formalistas respecto al método con el que alcanzar este resultado, pues, aunque admite que en los dominios finitos es posible utilizar la “*Matemática de segundo orden*”⁵² para producir

⁵⁰ CAÑÓN LOYES, C., La Matemática. Creación y descubrimiento. Universidad Pontificia Comillas (UPCO), Madrid, 1993, p. 261.

⁵¹ BROUWER, L.E.J: Over de grondslagen der wiskunde, Mass and van Suchtelen, Amsterdam, 1907, p. 179.

⁵² Es decir aquella que es una aplicación de las matemáticas, la cual sí establece relaciones causales entre los elementos y símbolos matemáticos, convirtiéndose en una ciencia, en

resultados que tienen correspondencia con las construcciones matemáticas puras, las que genera el intelecto humano, y probar así su consistencia⁵³, no ocurre lo mismo, sin embargo, en el dominio de conjuntos infinitos, donde el principio de tercio excluso no es aplicable en matemáticas en modo alguno.

Ésta es la barrera que separa a formalistas e intuicionistas: el papel fundamental, como fuente de certeza de la Matemática, que los primeros asignan a la lógica y al lenguaje en su fundamentación y creación de este conocimiento⁵⁴. De esta divergencia se deriva que ambas escuelas defiendan dos conceptos distintos de demostración: para los formalistas, las demostraciones explícitas son “sucesiones finitas de fórmulas que o bien son axiomas o se obtienen a partir de ellos por medio de reglas de inferencia aceptadas”; en cambio, los intuicionistas las entienden como construcciones, en las que no hay lugar para las demostraciones indirectas de existencia, las cuales sí son aceptadas por los formalistas⁵⁵.

Ahora bien, el problema de su aplicación a la realidad física, a través de una fundamentación que la garantice, surge con más intensidad que nunca: ¿de qué modo están conectadas las matemáticas y la realidad física en el *nivel real*, el de las proposiciones con sentido, si la primera tiene la libertad de independizarse de la segunda en el *nivel formal*, el de las proposiciones ideales? Tal garantía sólo puede provenir de la intuición temporal, ya que, por un lado, es el elemento común, compartido por la realidad y por la matemática, a partir del cual la construimos; por otro lado, al ser ésta el fruto de construcciones intelectuales, podemos generar proposiciones ideales, sin conexión con la realidad, donde se ha realizado una abstracción de todo contenido y, por lo tanto, no tienen por qué verse limitadas por la realidad. Ésta sólo es aprehendida por las proposiciones matemáticas “reales”.

tanto que conjunto de secuencias causales repetibles en el tiempo y cuyos objetos proceden de la experiencia; en cambio, los objetos de la matemática pura son construcciones de la mente, que no están basados en la experiencia.

⁵³ Tal y como hizo Hilbert para mostrar la consistencia de la Aritmética.

⁵⁴ A pesar de que Hilbert acaba reconociendo, posteriormente, las raíces kantianas de su programa, esto es, que la fuente de certeza matemática está en la intuición temporal, su programa formalista no consigue independizar las matemáticas de la lógica y, por tanto, Brouwer considera al formalismo dentro del programa logicista, con todos los fallos, las limitaciones y errores que éste conlleva.

⁵⁵ Cf. “Apéndice” sobre el formalismo de Brouwer.

Sin embargo, este tipo de conexión, si bien pudiera ser suficiente para fundamentar la matemática, como conocimiento intuitivo de la realidad, mostraré que no es suficiente para garantizar el contenido intuitivo de las teorías físicas, cuya exigencia y compromiso realista es mayor que en matemáticas. Pero antes de llegar a ello, he de realizar un matiz muy importante: la intuición temporal como fundamento de la matemática puede ser suficiente, pero sólo en tanto que se la considere intuición empírica y no pura, ya que el carácter *a priori* de ésta es la responsable, a mi juicio, del problema fundamental del formalismo.

La cuestión está en que Hilbert quiso defender la existencia de proposiciones reales en matemáticas al tiempo que asignar validez universal y necesaria a este tipo de conocimiento, el de las matemáticas aplicadas a la física. Nótese que se trata del mismo asunto que el de los juicios sintéticos a priori de Kant. Por ello, su origen radica en que Hilbert considera a la intuición temporal como dada *a priori*; pero aquella validez si bien *podiera ser* importante para la matemática pura, dado su carácter de axiomas y relaciones lógicas anteriores a la experiencia, hecho en el que no entraré a discutir, no lo es en el terreno empírico en el que se mueven las teorías físicas a las que se aplican los modelos matemáticos.

Por lo tanto, mi propuesta es la siguiente: decir “sí” a la intuición temporal; pero negando su carácter de *a priori* en tanto fundamento de la matemática aplicada, es decir, de las “proposiciones reales” de Hilbert, pues éstas han de tener no sólo un fundamento lógico en tanto construcciones intelectuales, sino también empírico en tanto que se aplican a las teorías físicas. Con ello se resuelve parte del problema del contenido de verdad de dichas proposiciones, ya que parte de él provendría de la experiencia. Por esta razón, hay que negar la posibilidad de los juicios sintéticos a priori, fundamentados la intuición kantiana, pero tal renuncia sólo afecta al carácter de necesidad y universalidad de este tipo de conocimiento, lo cual no me parece un precio demasiado alto a pagar si el resultado es salvar el realismo de la ciencia, aunque ésta sea un conocimiento contingente, que exigirá revisiones y cambios según se vaya avanzando en él.

Hay muchos más autores y programas desarrollados durante la segunda mitad del siglo XX, que se podrían seguir usando como ejemplos; pero los dejaré a un lado porque con ellos me adentraría en cuestiones demasiado específicas de la fundamentación de la Matemática, que sobrepasan los objetivos de esta tesis. Basta señalar que, en nuestra época, las propuestas de los matemáticos para fundamentar su disciplina reconocen, por un lado, la incapacidad del programa logicista de reducir las

matemáticas a lógica, la Matemática a Metamatemática⁵⁶, y, por otro, las insuficiencias que el intuicionismo introduce en el quehacer matemático. Pero, también, son conscientes del problema que acabo de mencionar acerca del formalismo de Hilbert, a pesar de que éste resuelve los problemas que las anteriores fundamentaciones originaron⁵⁷, y buscan la fecundidad de nuevos fundamentos y nuevas fuentes de certeza para la Matemática por otros derroteros.

Pero, de cualquier forma, todas estas corrientes, o bien, niegan la posibilidad de encontrar una fundamentación intuitiva para las matemáticas, o bien, admiten que la única posible es aquélla que excluye a la intuición espacial y parten de la intuición temporal, aunque no con valor de “a priori kantiano”, que Hilbert sí utilizó, ya que este carácter formal les plantea los problemas que he expuesto.

De ahí que la mayor parte de las corrientes actuales hayan claudicado ante la posibilidad de hallar una fundamentación de la exactitud de la Matemática como sistema de verdades necesarias y universales, como, por ejemplo, la “pérdida de la certeza” de la que habla Kline, las “Matemáticas sin fundamentos” de Lakatos y Putnam o las “epistemologías ad hoc” de Steiner. Por tanto, para evitar tanto el relativismo como la racionalidad formal se buscará su fundamentación a través de los nuevos modelos globales de Wilder y Kitcher o desde el nuevo paradigma matemático de Lakatos, donde se cambia el concepto de verdad matemática y sus criterios de demostración y crecimiento.

Ahora bien, en tanto que Física y Matemática son dos tipos distintos de conocimiento, pero que se aproximan el uno al otro, tanto en el

⁵⁶ “... es decir, los intentos de convertir el quehacer matemático en la justificación lógica de las expresiones plasmadas en lenguaje de teoría de conjuntos, ignorando otros modos de expresión y otras formas de razonamiento”. CAÑÓN LOYES, C., La Matemática. Creación y descubrimiento. Universidad Pontificia Comillas (UPCO), Madrid, 1993, p. 269.

⁵⁷ Este problema no lo tenían aquellas escuelas de un modo tan acuciante como en el caso de Hilbert porque no necesitaban justificar el contenido de verdad de las propiedades reales (finitistas) sin que éstas posean un origen empírico: la conjugación de las ideas de ambas corrientes, en lo relativo a la intuición y a la lógica, es lo que plantea el dilema. Pues, para los formalistas las proposiciones matemáticas tampoco tienen un origen empírico pero es que estos no defienden la existencia de aquellos dos tipos de proposiciones, finitistas (o con contenido) e ideales, que Hilbert propone para que estas últimas permitan la existencia de un *infinito actual* y en cuanto a los logicistas en tanto que, a pesar de las paradojas, defienden una interpretación actualista del infinito, no les preocupa en absoluto la intuición kantiana, ya que, para ellos, el origen de la verdad matemática no está en ella sino en la Lógica, que es su garantía de certeza y esto lo pueden defender porque no se preocupan por la existencia de un nivel real de las matemáticas aplicadas al mundo físico.

dominio de la física matemática como en el de las matemáticas aplicadas, tenemos que, si bien pudiera aceptarse una fundamentación de la Matemática exclusivamente basada en la intuición temporal, no podemos *renunciar del todo a la intuición espacial* a la hora de explicar cómo es posible aplicar este tipo de conocimiento a la realidad física y, por tanto, cómo es que la Física puede describir realmente el mundo objetivo (exterior).

Esto es, para garantizar el significado extralingüístico de los conceptos descriptivos de la Física⁵⁸ y, con ello, defender el realismo científico de las teorías, se ha de mantener el valor cognoscitivo, no sólo de la intuición temporal, como en matemáticas puras, sino también el valor de la intuición espacial, tal y como revelan las reflexiones de Bergson. Razón por la cual he de dedicarles el siguiente análisis.

c) La fundamentación intuitiva de Bergson del conocimiento científico: la espacialidad

En el apartado anterior expuse la importancia que tiene la intuición temporal para fundamentar y garantizar la validez del conocimiento matemático y del mismo modo es también imprescindible para la Física; sin embargo, para esta última, no es suficiente si se quiere salir del nivel matemático y buscar una garantía de la interpretación física, que se ha realizado de tal formalismo. Es cierto que la física cuántica nos ha mostrado que no podemos tener imágenes del mundo físico, lo cual quiere decir que la intuición espacial nos ha fallado a la hora de obtener una representación espacial real de aquél. Sin embargo, la posibilidad de figurar los objetos materiales, de formarnos una imagen espacial de ellos, es tan importante para nuestro entendimiento como, a continuación, revelarán las aportaciones de Bergson a estas reflexiones acerca del contenido intuitivo de la física cuántica.

Primeramente, Bergson distingue entre dos tipos de conocimiento: el conocimiento intelectual, del que se sirve la ciencia, es el que realiza la inteligencia estableciendo leyes, es decir, relaciones cuantitativas y constantes entre aquello que tienen en común una multitud de objetos

⁵⁸ Empleando la terminología de Hilbert, diríamos: *para garantizar el contenido de verdad de las proposiciones reales*.

singulares⁵⁹; de estas relaciones, la inteligencia extraerá los rasgos generales, que comparten entre sí los objetos singulares, para formarnos una idea general de ellos y construir conceptos⁶⁰. Este modo de conocer por conceptos es un conocimiento sobre lo externo, al cual se llega utilizando la lógica, el análisis conceptual y la experiencia sensible y cuyo medio de transmisión es, por lo tanto, el lenguaje: los conceptos son el elemento común a este tipo de conocimiento, que se elabora con ellos, y a nuestro lenguaje; por ello no es extraño que éste se haya volcado sobre el mundo externo de los objetos materiales, de las figuras espaciales, y que nuestro pensamiento se adapte tan bien a ellos a través de las definiciones y de los conceptos que elaboramos con el lenguaje⁶¹. Citaré a Bergson:

“¿Qué es, en efecto, la inteligencia? La manera humana de pensar. Ella nos ha sido dada, como el instinto a la abeja, para dirigir nuestra conducta. Habiéndonos destinado la naturaleza a utilizar y a dominar la materia, la inteligencia sólo evoluciona con facilidad en el espacio y sólo se siente a gusto en lo inorgánico. Originalmente, tiende a la fabricación; se manifiesta por una actividad que preludia al arte mecánica y por un lenguaje que anuncia a la ciencia, todo el resto de la mentalidad primitiva es creencia y tradición. El desarrollo normal de la

⁵⁹ “Por lo cual también se ha dicho, con razón, que la ciencia antigua se ocupaba de los *conceptos*, mientras que la ciencia moderna busca *leyes*, relaciones constantes entre magnitudes variables. El concepto de lo circular le bastaba a Aristóteles para definir el movimiento de los astros. Pero, incluso con el concepto más exacto de forma elíptica, Kepler no hubiera creído explicar el movimiento de los planetas. Necesitaba una ley, es decir, una relación constante entre las variaciones cuantitativas de dos o más elementos del movimiento planetario”. BERGSON, H., La evolución creadora, p. 289.

⁶⁰ Sirvan como ejemplo estas palabras de Bergson: “Nuestra facultad normal de conocer es, pues, esencialmente una potencia de extraer aquello que es estable y regular en el fluir de lo real. ¿Se trata de percibir? La percepción se apodera de las conmociones infinitamente repetidas, que son luz o calor, por ejemplo, y las contrae en sensaciones relativamente invariantes (...). ¿Se trata de concebir? Formar una idea general es abstraer de unas cosas diversas y cambiantes un aspecto común que no cambia o, al menos, que no ofrece a nuestra acción una captación invariable. La constancia de nuestra actitud, la identidad de nuestra reacción eventual o virtual a la multiplicidad y a la variabilidad de los objetos representados, he aquí lo que marca ante todo y diseña la generalidad de la idea. ¿Se trata, en fin, de comprender? Es simplemente encontrar conexiones, establecer relaciones estables entre unos hechos que pasan, deducir leyes: la operación es tanto más perfecta cuanto más precisa es la relación y más matemática la ley. Todas estas funciones son constitutivas de la inteligencia”. BERGSON, H., El pensamiento y lo moviente, pp. 90-91.

⁶¹ Cf. BERGSON, H., La evolución creadora, cap. III, pp. 170-239.

inteligencia se efectúa, por tanto, en la dirección de la ciencia y de la tecnicidad”⁶².

Sin embargo, hay otro tipo de conocimiento, diametralmente opuesto al de la inteligencia, el cual se forja a partir de la *intuición* y cuyo objetivo es aprehender aquello que las cosas tienen de únicas e irrepetibles, penetra lo singular dirigiéndose hacia lo interno y por lo tanto no podrá formar conceptos ni símbolos, incapacitándole así para la comunicación lingüística. De modo que esto que llama la “intuición sensible” es incommunicable y se ha de ejercitar en la intimidad de la conciencia.

Aquí ya se advierte la diferencia entre el significado con el que Bergson usa la expresión “conocimiento intuitivo” y el significado que he venido dándole en este trabajo. Para el filósofo francés el conocimiento intuitivo es la aprehensión inmediata y directa de nuestra conciencia, como duración pura, y comienza con la captación de nuestro propio ser y su duración en el tiempo, pero, después, es también capaz de trascender la pura interioridad personal y adentrarse en la interioridad de los objetos siguiendo la corriente íntima que recorre la vida y la realidad en su totalidad; es la captación directa e inmediata de un movimiento original, del “aliento o flujo vital”, que dice Bergson:

“La intuición de la que hablamos se refiere, pues, ante todo a la duración interior. Toma una sucesión que no es yuxtaposición, un crecimiento interno, la prolongación ininterrumpida del pasado en un presente que usurpa terreno al porvenir. Es la visión directa del espíritu por el espíritu. Pero nada de interposición, ni de refracción a través del prisma, una de cuyas facetas es espacio y otra es lenguaje. En lugar de estados continuos a otros estados, que llegarán a ser palabras yuxtapuestas a otras palabras, nos hallamos ante la continuidad indivisible, y por ello sustancial, del flujo de la vida interior. Intuición significa, pues, por encima de todo, conciencia, pero conciencia inmediata, visión que apenas se distingue del objeto visto, conocimiento que es contacto y hasta coincidencia (...). La simpatía y la antipatía irreflexiva, que son con frecuencia adivinatoras, testimonian una posible interpenetración de las conciencias humanas, habría, pues, unos fenómenos de endósmosis psicológica. La intuición nos introduciría en la conciencia en general. Pero ¿sólo simpatizamos con las conciencias? Si todo ser viviente nace, se desarrolla y muere, si la vida es una evolución, y si la duración es aquí una realidad, ¿no hay también una

⁶² BERGSON, H., El pensamiento y lo moviente, p. 75.

intuición de lo vital, y por consiguiente una metafísica de la vida, que prolongará la ciencia de lo viviente?”⁶³.

La intuición filosófica penetra en este aliento vital, aprehendiendo *lo absoluto* en sentido *cualitativo*: es aquello que se encuentra en lo simple, en el objeto singular; se trata de la cualidad pura, la propia realidad en sí misma, cuya esencia es el movimiento continuo e indivisible⁶⁴.

Por el contrario, la ciencia, a través de la matemática, se acerca a lo *absoluto cuantitativo*, como la representación de una serie o progresión infinita actual, la cual es reducida a elementos fijos e interrelacionados de una escala numérica⁶⁵. Por ejemplo, para que la ciencia física, en concreto la mecánica, pueda conceptualizar el movimiento de un objeto ha de convertirlo en algo discontinuo, dividiéndolo en posiciones numeradas y sucesivas pero fijas, inmóviles⁶⁶. De ahí la distinción que traza Bergson entre ciencia y filosofía como dos tipos de saberes inconmensurables,

⁶³ BERGSON, H., El pensamiento y lo moviente, p. 31. Más adelante confiesa que no puede darse una definición de intuición, pero sí se puede extraer de ella un sentido fundamental: “pensar intuitivamente es pensar en duración”. *Ibid*, p. 33.

⁶⁴ Cf. BERGSON, H., El pensamiento y lo moviente, pp. 29-51.

⁶⁵ “Y la inteligencia está en lo verdadero en tanto se vincula, amiga de la regularidad y de la estabilidad, a lo que hay de estable y regular en lo real, a la materialidad. Entonces toca uno de los lados de lo absoluto, como nuestra conciencia toca otro cuando capta en nosotros una perpetua eflorescencia de novedad, o cuando, al ampliarse, simpatiza con el esfuerzo indefinidamente renovador de la naturaleza. El error comienza cuando la inteligencia pretende pensar uno de los aspectos como ha pensado el otro, y emplearse en un menester para el cual no ha sido hecha”. BERGSON, H., El pensamiento y lo moviente, p. 91.

⁶⁶ “Lo que quiero sobre todo decir es que está astricto el conocimiento usual, como el conocimiento científico y por las mismas razones que él, a tomar las cosas en un tiempo pulverizado, donde un instante sin duración sucede a otro instante que no dura más. El movimiento es para él una serie de posiciones, el cambio una serie de cualidades, el llegar a ser una serie de estados. Parte de la inmovilidad (como si la inmovilidad pudiera ser otra cosa que una apariencia, comparable al efecto especial que un móvil produce sobre otro móvil cuando están regulados unos sobre otro), y por un ingenioso ordenamiento de inmovilidades recompone una imitación del movimiento que sustituye al movimiento mismo: operación prácticamente cómoda, pero teóricamente absurda, incrementada por todas las contradicciones, por todos los falsos problemas que la metafísica y la crítica encuentran ante sí (...). Sin duda la intuición comporta muchos grados de intensidad, y la filosofía muchos grados de profundidad; pero el espíritu que le haya vuelto a traer a la duración vivirá ya de la vida intuitiva, y su conocimiento de las cosas será ya filosofía. En lugar de una discontinuidad de momentos, que se reemplazarían en un tiempo infinitamente dividido, percibirá la fluidez continua del tiempo real, que transcurre indivisible”. BERGSON, H., El pensamiento y lo moviente, p. 118.

irreducibles entre sí, pero que se han de completar la una a la otra para satisfacer el anhelo de conocimiento del espíritu humano. Tal distinción se resume del siguiente modo: la materia, la extensión y todo lo externo, pertenecen a la ciencia y a la inteligencia, la cual procesa información, de la que extrae relaciones con las que elabora leyes; la filosofía se ocupa de la vida íntima, del espíritu y de todo lo interno, donde también cae el concepto de duración pura y de tiempo real, porque la intuición no se detiene en las relaciones externas, sino que prescinde de ellas para penetrar en la interioridad dinámica de las cosas, en su indefinible esencia, que es la cualidad móvil instalada en un presente eterno: el “fluido vital”.

Aunque las ideas de Bergson están en otra línea de pensamiento distinta a la mía, su contribución a la gnoseología puede servir para subrayar la importancia que el concepto de espacio tiene para la Física. Cuando Bergson habla de dos tipos de conocimiento, ha de buscar dos tipos de fundamentación para ellos, de tal forma que el concepto de espacio es el fundamento gnoseológico del conocimiento científico, en general, y la intuición del “tiempo real” es el del conocimiento filosófico.

No entraré en sus consideraciones sobre la intuición porque no guardan ninguna relación con mi tesis y las razones de esto son, fundamentalmente, dos. En primer lugar, es una concepción tan metafísica de la intuición, como duración pura, que no es extraño que el propio Bergson la mantenga al margen de todo lo que sea conocimiento científico⁶⁷. En segundo lugar, el objetivo que persigue al afirmar que sólo el tiempo tiene carácter intuitivo, porque el espacio es concepto y no intuición, no es el mismo que el mío; pues, en tanto que su noción de tiempo desborda toda capacidad científica de aprehensión de la realidad física, para Bergson este tiempo no es una condición de posibilidad de los objetos materiales y su aplicación a ellos supone un tiempo intelectualizado y falso, que, al ser materializado, pierde su auténtica naturaleza dinámica⁶⁸.

⁶⁷ En relación con la intuición filosófica de Bergson y sus ideas sobre la percepción del cambio, véase, por ejemplo: BERGSON, H., El pensamiento y lo moviente, caps. IV y V, pp. 101-146.

⁶⁸ “Numerosos son los filósofos que han sentido la impotencia del pensamiento conceptual, para alcanzar el fondo del espíritu. Numerosos, por consiguiente, son aquellos que han hablado de una facultad supraintelectual de intuición. Pero, como han creído que la inteligencia operaba en el tiempo, han concluido de ello que rebasar la inteligencia consistía en salir del tiempo. No han visto que el tiempo intelectualizado es espacio; que la inteligencia trabaja sobre el fantasma de la duración y no sobre la duración misma; que la eliminación del tiempo es el acto habitual, normal, trivial, de nuestro entendimiento; que la relatividad de nuestro conocimiento del espíritu viene precisamente de ahí, y que desde entonces, para pasar de la intelección a la visión, de lo relativo a lo absoluto, no hay que

No obstante, Bergson realiza todas estas maquinaciones, en torno a la idea de tiempo y de intuición, porque tiene un objetivo, que se aparta diametralmente del que yo persigo: probar que existen dos tipos de conocimiento distintos para justificar y fundamentar la posibilidad del conocimiento filosófico fuera del ámbito científico; en cambio, este trabajo se centra en justificar la validez del conocimiento científico, el cual fue puesto en duda por la física cuántica, y a él me remito.

En oposición a las ideas de Bergson, hasta ahora he defendido la necesidad de que el tiempo sea una intuición, aunque no en todo su sentido kantiano, ya que si bien es característica de la realidad *material* y de nuestra sensibilidad, no lo es en tanto intuición pura. De ahí que sobre el tiempo se fundamente la condición de posibilidad de todo conocimiento físico y, a la vez, sirve de base a la condición de posibilidad de los objetos materiales, en concreto, de los objetos cuánticos. Pero, además de esto, defenderé que no se puede renunciar del todo a las representaciones plásticas del mundo físico, que la intuición espacial nos ofrece de la realidad externa, material y extensa.

A pesar de que Bergson no considere al espacio como intuición, estoy de su lado cuando, al analizar el conocimiento científico, afirma que se necesita el concepto de espacialidad para hacer Física no sólo porque el espacio sea una condición de posibilidad del entendimiento, sino, además, porque el objeto de tal ciencia es la materia, la realidad externa del mundo físico, cuya característica primera es su extensionalidad en el espacio, sobre la que se construyen los conceptos mecánicos como los de velocidad, posición, dirección, etc. Este movimiento de la materia, que estudia la mecánica, tiene la condición *sine qua non* de la extensión espacial y sin ella ningún concepto mecánico tiene sentido. Por esto dice Bergson que la inteligencia sólo puede conocer lo que podemos comparar, medir, relacionar y dividir, en una palabra *lo visible*, lo cual implica que el movimiento se haga comprensible a la inteligencia reduciéndolo a una serie de posiciones fijas y sucesivas en el espacio⁶⁹. No obstante, tal

salir del tiempo (nosotros hemos salido ya de él); es necesario, por el contrario, volver a situarse en la duración y recobrar la realidad en la movilidad, que es su esencia". BERGSON, H., *El pensamiento y lo moviente*, pp. 29-30.

⁶⁹ "La inteligencia parte ordinariamente de lo inmóvil, y reconstruye mal que bien el movimiento con unas inmovilidades yuxtapuestas. La intuición parte del movimiento, lo coloca o más bien lo percibe como la realidad misma, y sólo ve en la inmovilidad un momento abstracto, instantáneo, puesto por nuestro espíritu sobre una movilidad. La inteligencia se da ordinariamente en las cosas, entendiéndolo por ello lo que es estable, y hace del cambio un accidente que se agregaría a él. Para la intuición lo esencial es el cambio; en

materialización del movimiento y su exteriorización en el espacio y en el tiempo ha de recurrir al infinito, pues las partes sucesivas que se recorren son infinitas y constituyen una discontinuidad numérica⁷⁰. Para realizar estos cálculos se construyó el análisis infinitesimal: partes discontinuas en una serie indefinida que componen el continuo. Bergson piensa que la extensionalidad espacial es tan importante para la ciencia que incluso los números son construcciones matemáticas espaciales.

Dentro de la doctrina bergsoniana, la cual se aleja de mi tesis, la intuición es conocimiento interior y nunca exterior, que escapa a toda definición, por esto no puede haber intuición espacial; la intuición es esencialmente temporal, es el acto por el que intuimos la duración pura, la cual es indefinible en conceptos porque éstos sólo aprehenden lo material, lo externo, lo espacial. Pero esta “duración pura” es el tiempo intuido por la conciencia en su auténtica esencia de constante fluir, de movimiento indivisible y continuo; frente a este tiempo está el “tiempo matemático”, un tiempo falseado por la inteligencia, espacializado, donde la duración real, que es indivisible, se sustituye por una duración compuesta de divisiones artificiales, que ha sido reconstruida a partir de un esquema espacial, discontinuo y compuesto de partes inmóviles y fijas: es el “tiempo-esquema”, el tiempo sin duración real; el tiempo que definimos y no el que intuimos. De modo que el concepto de tiempo, que utiliza la inteligencia para hacer ciencia⁷¹, es sólo una característica más del espacio en el que la materia se desplaza.

cuanto a la cosa, tal como la inteligencia lo entiende, es un corte practicado en medio del porvenir y erigido por nuestro espíritu en sustitución del conjunto. El pensamiento se representa ordinariamente lo nuevo como un nuevo reajuste de elementos preexistentes; para él nada se pierde, nada se crea. La intuición, adherida a una duración, que es desarrollo progresivo (crecimiento), percibe una continuidad ininterrumpida de imprevisible novedad; ella ve, sabe que el espíritu saca de sí mismo más de lo que tiene, que la espiritualidad consiste en esto mismo, y que la realidad, impregnada de espíritu, es creación”. BERGSON, H., El pensamiento y lo moviente, p. 33.

⁷⁰ En relación a la crítica que realiza Bergson del concepto de movimiento mecánico, consúltese, por ejemplo: BERGSON, H., El pensamiento y lo moviente, pp. 132-135.

⁷¹ “Digamos que nuestra ciencia no se distingue solamente de la ciencia antigua en que investiga leyes, ni tampoco en que esas leyes enuncian relaciones entre magnitudes. Hay que añadir que la magnitud a la cual quisiéramos referir todas las demás es el tiempo, y que la *ciencia moderna debe definirse sobre todo por su aspiración a tomar el tiempo como variable independiente*. Mas ¿de qué tiempo se trata?” BERGSON, H., La evolución creadora, pp. 291-292.

Bergson afirma que la ciencia antigua es una ciencia estática en tanto que sólo se preocupaba de explicar la pluralidad y diversidad del mundo a partir de una *esencia* de las cosas, que era inmutable y eterna; en cambio, la ciencia moderna acepta estos cambios continuos de la naturaleza y los explica paso a paso, atrapando en sus leyes todos los momentos sucesivos de tales movimientos en tanto que “variaciones cuantitativas” en un tiempo homogéneo. Sin embargo, dicho movimiento sólo es, para la ciencia, una síntesis “cinematográfica” de instantes estáticos, inmóviles y atemporales, con lo cual, aquélla detiene y paraliza al movimiento, despojándole de toda emergencia de novedad, de unicidad e individualidad y de la heterogeneidad de los momentos singulares, que posee la duración pura, y, por lo tanto, emplea un concepto de tiempo también estático que, en realidad, es un contrasentido porque descompone el fluir del tiempo en instantes fijos, unidades de tiempo, donde se da el movimiento en función de “paradas *virtuales* del móvil” a lo largo de su trayectoria espacial; de ahí, que surjan las paradojas de Aquiles y la tortuga y de la flecha, formuladas por Zenón en relación con el movimiento.

A partir de esta noción artificial de tiempo, continúa Bergson, se concibe la numeración: el número, como una serie de posiciones sucesivas, es sólo un mecanismo artificial, un instrumento, construido por nosotros para comprender espacialmente la materia en su extensión. Por ello afirma que, aun siendo el número “la síntesis de una multiplicidad de unidades”, tales unidades han de ser detenidas en el tiempo, paralizadas e inmovilizadas para ser contadas, lo cual implica que las hemos yuxtapuesto unas a otras y la yuxtaposición ya es un concepto espacial, un concepto de lo exterior y no del tiempo. Por lo tanto, si estas unidades se formaran en el tiempo puro jamás podrían ser inmovilizadas de tal forma que constituyeran la idea de número porque tal síntesis de ellas es, en realidad, una síntesis de una multiplicidad instantánea que no puede entenderse cómo se ha formado, a no ser que imaginemos que han dejado, al pasar, un “rastro” fijo en el espacio; el número sería la síntesis de tal marca espacial. Pero, para Bergson, poner al tiempo en la base de esta concepción es un error, pues:

“... un momento del tiempo no podría cómo conservarse para agregarse a otros. Si se disocian los sonidos es que dejan tras de sí intervalos vacíos. Si se les cuenta, es que permanecen los intervalos entre los sonidos que pasan. ¿Cómo permanecerían estos intervalos si fuesen pura

duración y no espacio? Es, por tanto, en el espacio indudablemente donde se efectúa la operación”⁷².

No obstante, no puedo estar de acuerdo con Bergson aunque admita con él que, cuando contamos unidades, podemos referir los números a objetos materiales extendidos en el espacio, pero no sólo contamos objetos espaciales. ¿Acaso, no contamos también sonidos, por ejemplo? Puede decirse que estos sonidos son vibraciones de un sustrato material y, por lo tanto, espacial; por ello, Bergson afirmaría que contar estos sonidos es un proceso de figuración simbólica de aquéllos en un espacio ideal, a partir de lo cual creemos contarlos en la pura duración⁷³.

Sin embargo, la naturaleza de la percepción auditiva, si bien necesita de un medio así para producirse y propagarse, no puede ajustarse a una representación espacial, a no ser simbólica: un sonido se define por el número de vibraciones producidas en un intervalo de tiempo dado. Tales vibraciones necesitan de un medio material y de un espacio en el que están comprimidas; pero a nuestra percepción del sonido ya producido no le corresponde una representación pictórica, una imagen espacial, a no ser a través de un símbolo, que puede ser su situación en el pentagrama: una correspondencia simbólica con el espacio; ahora bien, este tipo de correspondencia simbólica no es de la misma naturaleza de la que habla Bohr, ya que tal simbolización tiene un carácter arbitrario y convencional.

Aun así, aunque todo lo que contemos esté extendido en el espacio, el origen empírico de una percepción no debe confundirse con su origen gnoseológico: el hecho de que “contemos bolas” y después nos

⁷² BERGSON, Ensayo sobre los datos inmediatos de la conciencia, p. 74.

⁷³ Pero esta creencia es necesariamente falsa para Bergson porque, aun pensando que estamos contando momentos de la duración cuando numeramos, estos momentos del tiempo si son “susceptibles de adicionarse entre sí son todavía puntos del espacio. De donde resulta, en fin, que hay dos especies de multiplicidad: la de los objetos materiales, que forma un número inmediatamente, y la de los hechos de conciencia, que no podrían tomar el aspecto de un número sin la mediación de alguna representación simbólica, en la que interviene, necesariamente, el espacio”. BERGSON, Ensayo sobre los datos inmediatos de la conciencia, p. 74. Este proceso de representación simbólica en el espacio de los hechos de conciencia forma parte de una actitud general de nuestra inteligencia sobre todo aquello que no puede abarcar, todo lo que no sea materia, discontinuidad o cantidad: dice Bergson que la inteligencia realiza una especie de traducción de todo lo cualitativo en términos cuantitativos, para poder conceptualizar el mundo, lo real; sin embargo, esta traducción es sólo “una interpretación simbólica de la cualidad en cantidad”. BERGSON, Ensayo sobre los datos inmediatos de la conciencia, p. 60.

abstraigamos de ellas⁷⁴ no justifica que el origen empírico de este acto, el proceso de numeración, no tenga otro origen gnoseológico: algo que capacite a nuestro intelecto para el hecho de contar bolas. Este algo es el tiempo como componente de nuestro pensar: intuición simple, elemento irreductible a cualquier otro. Porque, aunque al contar espacialicemos y materialicemos objetos en nuestra imaginación, lo decisivo, a la hora de numerar tales objetos, es que también *interiorizamos* una sucesión que fluye directamente por nuestra conciencia y a ella atribuimos una serie numérica, que más tarde remitimos a los objetos. ¿A qué otra cosa puede deberse este fenómeno interno si no es al tiempo?

Además, es cierto que el tiempo con el que la ciencia trabaja no puede ser un tiempo cualitativo, una duración continua que no admite descomposición alguna; aquél tiempo ha de estar matematizado y compuesto de unidades cuantitativas a las que poder referir magnitudes. Es más, en tanto que este tiempo es el que podemos percibir, el que nuestra inteligencia puede conceptualizar y al que puede referir relaciones y leyes, como incluso Bergson afirma, dicho tiempo es el que se necesita como condición del conocimiento científico. No obstante, tal matematización del tiempo no supone su espacialización, a pesar de que siempre lo refiramos a la materia, pues hacer esto es lo natural ya que aquélla es el objeto de estudio de la ciencia. El tiempo que ésta ha matematizado para explicar el movimiento puede presentarse como un tiempo espacializado o no: dicha espacialización es algo a lo cual la Física en general tiende a hacer pero no la Matemática, así como tampoco lo hace la física cuántica.

Ya he argumentado, en oposición a la postura que toma Bergson, que el concepto de número se construye a partir de una síntesis temporal y no espacial porque al contar segundos en nuestro interior, sí que podemos hacer abstracción de todo lo material y construir una serie numérica a partir de unos imaginarios sonidos, que si bien necesitarían de un medio material para producirse y transmitirse en el caso de ser reales, en tanto que sólo los imaginamos y los reproducimos mentalmente no parecen necesitar nada externo, ni a la materia ni al espacio, para que nuestro intelecto los pueda

⁷⁴ Dice Bergson que, tras realizar esta abstracción, nos *habituamos* a contar números abstractos, lo cual nos crea la *ilusión* de “contar en el tiempo más que en el espacio”: “es indudable que se habrán contado así momentos de la duración más bien que puntos del espacio; pero la cuestión está en saber si no habremos contado los momentos de la duración por puntos del espacio”. BERGSON, H., Ensayo sobre los datos inmediatos de la conciencia, pp. 67-68. Pero tal proceder no tiene por qué ser una ilusión si no ponemos en la cualidad y en lo continuo, en lugar de la cantidad discreta, lo específico de la naturaleza del tiempo y de lo real.

formar y constituir en números, esquemas numerales; sólo nos queda el tiempo, en tanto sentido interno, como la intuición responsable de la numeración y, por lo tanto, como fundamento de la Matemática.

De este modo, el cambio que se ha de introducir en la Física, para entender cómo es que funciona la nueva teoría cuántica, es sustituir el tiempo espacializado de la mecánica clásica por una concepción de tiempo, más abstracto, que sea capaz de fundamentar este tipo de conocimiento, a partir de un nuevo modelo de inteligibilidad donde aquél asuma las funciones que realiza en matemáticas más otras que garanticen su conexión con el espacio y la materia: la exterioridad, en suma.

Por otro lado, estoy de acuerdo con Bergson cuando no considera intuición, en todo su sentido, al espacio; pero esta coincidencia se debe a distintas razones: para aquél el espacio no puede ser intuición porque ésta es la captación interior de la duración pura; pero, a lo largo de este estudio, he tenido que renunciar al espacio como intuición porque el espacio que percibimos ya no es condición de posibilidad de los objetos físicos, sólo es condición de posibilidad de nuestra sensibilidad.

Por este motivo ya no podemos seguir considerándolo una intuición; pues ha perdido la faceta objetiva que posee y caracteriza a toda intuición. Pero, en tanto que su condición subjetiva de intuición empírica, como el espacio que percibimos y que es directamente accesible a nuestro conocimiento, como condición de posibilidad del entendimiento humano, conserva toda vigencia, no podemos renunciar a tener una representación espacial de este tipo del mundo material. En definitiva, ésta es la razón que alego por la que Bohr defiende la indispensabilidad del lenguaje clásico y de la imprescindibilidad de que la física cuántica ofrezca descripciones espacio-temporales de los sistemas físicos, aunque estas descripciones hayan de ser simbólicas.

Por lo tanto, repito que el tiempo es lo único que nos capacita para fundamentar gnoseológicamente el conocimiento físico como aprehensión de la realidad externa, dado que el espacio, aunque sea condición de nuestra sensibilidad y percepción, no es condición, o determinante, del objeto microfísico; no es un elemento objetivo de la realidad física, pues no estructura dicha realidad, en cambio el tiempo sí.

Ahora bien, si se tratara del tiempo cualitativo del que nos habla Bergson, la realidad sí estaría imbuida de este tiempo en tanto que es vida y la vida es constante fluir, duración pura; sólo que este tiempo real de

Bergson no es, ni podrá serlo nunca, objeto científico⁷⁵: la ciencia no puede aprehender este tiempo a través de la inteligencia y, por consiguiente, no puede servir de fundamento de aquélla. El único tiempo que ésta es capaz de entender y conceptualizar es el tiempo que es aprehendido en las series numéricas, como la serie de números pares o la de los impares, la de los múltiplos o la de los divisores; pero, para Bergson, éste no es el tiempo real, no es condición de posibilidad de lo real y no existe en la realidad más que como una conceptualización de nuestra inteligencia para estructurar la materia y su movimiento mecanicista. De ahí que sólo sirve de fundamento científico en tanto que es una espacialización de la duración pura: sólo el espacio, desde el que aprehendemos la forma geométrica de la materia (recta, curva, triángulo, esfera...), junto con la manifestación que él nos facilita del tiempo, es capaz de garantizar nuestro conocimiento sobre la materia (realidad física).

Insistiré en que no comparto esta distinción en la noción de tiempo, la cual es esencial para Bergson porque su interés estriba en justificar la validez del conocimiento filosófico como otro tipo de saber distinto e independiente del conocimiento científico; sin embargo, se ha de admitir que si la espacialidad es lo que define, primordialmente, a la materia por su característica de extensionalidad y, por ello, el espacio ha de tener una existencia real en la materia, el tiempo intelectualizado, no puede ser tan “falso” como afirma Bergson, ya que la materia misma lo convierte en real: el tiempo es condición de posibilidad de los objetos matemáticos y lógicos y, por ende, de los objetos materiales, en tanto que éstos pueden definirse en tales términos.

He mantenido en numerosas ocasiones que el espacio de nuestra percepción no puede ser el espacio donde se inscribe la materialidad cuántica porque como tal ha sido negado por la teoría y rechazado por la experiencia; pero el tiempo empírico sí puede ser el mismo tiempo al que obedece dicha materialidad. Es más, *debe* ser el mismo, para que podamos seguir intelectualizándolo en series numéricas con las que, de hecho, se ha construido un formalismo matemático, consistente y coherente, que aplicamos, en todo su rigor, a todas las experiencias, observaciones, mediciones y experimentaciones que, hasta ahora, tenemos de los sistemas

⁷⁵ Bergson explica la naturaleza cualitativa de la duración pura, por ejemplo, en Ensayo sobre los datos inmediatos de la conciencia, pp. 84-114, y la imposibilidad de que este tiempo pueda ser ni el fundamento ni el objeto de la ciencia, en las páginas siguientes, 115-127.

cuánticos: todos los fenómenos conocidos caen dentro de su ámbito y son explicados por él.

Defender que este tiempo, matematizado para adaptarse a la realidad material, provenga o no de un proceso intelectual de espacialización de su esencia, que es la duración perpetua, continua e indivisible, depende de si nuestro interés se centra en fundamentar el conocimiento científico o el filosófico, si es que se admite la distinción de Bergson. Si nuestro objetivo es, únicamente, el primero no tenemos ningún motivo para dudar de su realidad, en tanto que estamos acotando la realidad en *realidad física de los objetos materiales*; si por el contrario, nuestro interés es metafísico y queremos abarcar la realidad en su totalidad, incluyendo todas sus manifestaciones y no sólo la materialidad: el espíritu humano, la muerte, la vida consciente, la libertad, la conducta moral, etc., no es extraño que introduzcamos unos factores ajenos a la materia, a la realidad física de los objetos materiales, pero que, precisamente, por ser ajenos a ella, en nada atañen a las consideraciones que hagamos acerca de su conocimiento y de su realidad.

Ahora bien, en tanto que Bergson no llegó a tener conocimiento de la física cuántica, la crítica que realiza sobre la noción de movimiento y de materia sólo se refiere a las concepciones clásicas y relativistas. Si ceñimos su análisis al marco exclusivo de la física clásica, se le ha de dar, totalmente, la razón.

Es decir, esta crítica suya en torno a la concepción “estática”, cinematográfica y discontinua, del movimiento⁷⁶ frente a una concepción puramente dinámica de éste, donde se dé una auténtica emergencia de novedad y de singularidad irrepetible, se debe a que la física clásica posee un concepto demasiado especializado de la materia.

No obstante, dado que la física cuántica se ha visto incapacitada para obrar de este mismo modo, su conceptualización del movimiento, del

⁷⁶ “En lugar de atenernos al devenir interior de las cosas, nos situamos fuera de ellas, para reconstruir su devenir artificialmente. Tomamos vistas casi instantáneas de la realidad que pasa, y como son características de esa realidad nos basta con ensartarlas a lo largo de un devenir abstracto, uniforme e invisible, situado en el fondo del aparato del conocimiento, para imitar lo característico del devenir mismo. En general, percepción, intelecto y lenguaje proceden así. Tanto si se trata de pensar el devenir, como de expresarlo o, incluso, de percibirlo, no hacemos más que accionar una especie de cinematógrafo interior. Todo lo que precede podría resumirse diciendo que el *mecanismo de nuestro conocimiento usual es de naturaleza cinematográfica*”. BERGSON, H., *La evolución creadora*, p. 267. Pero lo importante es que no sólo procede así el conocimiento usual, sino que también lo hace el conocimiento científico, que Bergson analiza desde el punto de vista de la mecánica clásica.

mundo físico y de la materia se asemeja a las ideas que mantuvo Bergson respecto del primero pero que contrapuso a la naturaleza de la materia, de los objetos físicos, porque no tuvo en sus manos más que el marco clásico, donde se inscribieron las teorías clásicas bajo el emblema común de la plena espacialización del mundo físico y, por ende, de su representabilidad pictórica.

Sin embargo, tales semejanzas, que fueron sacadas a la luz por de Broglie⁷⁷, no pueden llevarse más lejos porque no puede ignorarse que existe una bifurcación insalvable entre la línea que recorrió el pensamiento de Bergson y la que sigue la epistemología de la física cuántica: el análisis y la crítica, que aquél realizó en torno a las ideas de movimiento, de acontecer y de duración pura en el tiempo, fue hecho para contraponer dos tipos de conocimiento distintos sobre la realidad, con dos objetivos distintos: la realidad física o material de uno de ellos frente a la realidad vital del otro; de esta forma, encontró una justificación para el conocimiento filosófico, que ninguna relación guarda con el conocimiento científico, que es el que aquí me ocupa porque, evidentemente, es donde se plantean todas las cuestiones epistemológicas de la física cuántica.

En definitiva, Bergson despreció la intuición temporal como fundamento de la ciencia y pretendió justificar la validez de este tipo de conocimiento sólo a partir de la extensionalidad espacial. Pero, en parte estaba equivocado porque, como argumenté en el anterior epígrafe, sin la intuición temporal no podemos fundamentar las matemáticas, las cuales son el armazón de toda ciencia y, sobre todo, de la física cuántica, dado el grado de abstracción y refinamiento matemático que alcanza su formalismo. Sin embargo, ya he advertido que este tiempo como intuición es una condición necesaria pero no suficiente.

Ésta es la encrucijada en la que nos encontramos; la misma a la que se enfrentó Bohr: no podemos renunciar a la intuición espacial a la hora de describir y entender el mundo físico, en toda su exterioridad y materialidad, y, no obstante, ésta nos ha fallado como fundamento intuitivo de la Física. Esto es debido a que se ha de mantener que el espacio de nuestra percepción, el euclídeo, no se adapta a un posible tipo de espacio real, característico de la realidad misma.

He de defender esta inadaptación y este fracaso de la representación espacial con un objetivo, que es mucho más importante de preservar que la propia capacidad de figurar los objetos materiales; me estoy refiriendo al realismo con el que la ciencia pretende describir el

⁷⁷ Cf. DE BROGLIE, L., Física y Microfísica, cap. IX, pp. 181-197.

mundo: se ha de renunciar a tener una representación plástica o figurativa de los objetos cuánticos, en el espacio de nuestra percepción, para que la física cuántica conserve el estatus de una *teoría completa* que *describe y aprehende* la realidad, dentro de lo que es posible hacer cuando teorizamos sobre un mundo, cuyas condiciones de posibilidad no son, exactamente, las mismas que las de nuestra razón y entendimiento.

En el epígrafe, que viene a continuación, analizaré el Esquematismo de Kant como otra posible pieza de este puzzle, donde busco la clave para justificar la insistencia de Bohr acerca de la completud de la física cuántica, como una teoría realista del mundo atómico, a pesar del fenomenismo con el que impregna a su solución epistemológica.

d) Un giro secante en torno al Esquematismo

En la Doctrina Trascendental del Método, Kant define la Matemática como el conocimiento que se obtiene mediante dos tipos de construcciones intuitivas de conceptos: la construcción ostensiva, que emplea la geometría euclídea y que puede considerarse como una teoría del espacio, y la construcción simbólica, necesaria para la aritmética y el álgebra, consideradas como teorías del tiempo. Esto es así, porque el tiempo, en tanto que orden interno de sucesión como intuición pura, nos capacita intelectualmente para la numeración y el cálculo, lo cual es suficiente para fundamentar en él la aritmética y el álgebra, tal y como expuse en el apartado dedicado al intuicionismo matemático.

Ahora bien, la forma del sentido interno, el tiempo, además de servir de esta base, tiene, para Kant, una función reguladora sobre la forma del sentido externo, el espacio. En el primer apartado expresé cómo en la Estética Trascendental se muestra no sólo la necesaria interdependencia entre estas formas *a priori*, sino también la primacía epistemológica o trascendental del sentido interno. El tiempo engloba al espacio porque, a partir del primero, puede realizarse una construcción matemática sólo numérica, con valor escalar, cuya representación espacial es una imagen simbólica, un signo numérico, el cual puede hacer referencia a la *extensión* de un objeto material sin que posea el valor de una descripción o construcción ostensiva de una figura geométrica en el espacio plano de tres dimensiones: cualquier elemento de las geometrías no-euclídeas puede servir de ejemplo a esta afirmación. Aun así, continúo con Kant, en tanto que el tiempo es la *regla* que usamos para la formación de la imagen (simbólica) pero que necesita del espacio para su *representación*, tenemos

que los símbolos algebraicos pueden convertirse en figuras geométricas, ya que tal interdependencia entre el espacio y el tiempo permite una “correspondencia”, a veces directa y otras veces sólo indirecta, con el carácter ostensivo de las figuras geométricas.

Si la *correspondencia es directa*, tenemos una representación pictórica, de naturaleza “propiamente espacial”, de los objetos físicos, donde espacio físico y gnoseológico coinciden plenamente; es decir, se ha conseguido describir y representar el objeto material en un espacio euclídeo, que es el espacio de nuestra percepción. Si no hay este tipo de correspondencia, porque el espacio que se pretende objetivar no es el de la geometría euclídea, se puede recurrir a una *correspondencia indirecta* del tipo de espacio no-euclídeo, que resulta ostensivamente irrepresentable tal cual es, pero del que se puede tener una representación de este tipo, ostensiva-figurativa-pictórica, por medio de un modelo simbólico, o dicho de una forma más explícita: por medio del carácter simbólico de un modelo temporal. Es evidente que el carácter tridimensional de la naturaleza humana hace imposible la representación directamente figurativa de las geometrías de más de tres dimensiones. Pero, al igual que podemos eliminar la tercera dimensión para realizar el dibujo de un sólido sobre un soporte (papel) de dos dimensiones y concebir tal representación como un modelo simbólico del objeto tridimensional original, también podemos hacer abstracción de la cuarta dimensión para crear un modelo tridimensional simbólico del espacio “curvo”; incluso, puede ser dibujado en un plano bidimensional, prescindiendo de aquellas dos dimensiones que resultan *irrepresentables dadas las condiciones del papel*.

Es cierto que Kant nunca explicitó el valor de estas construcciones simbólicas, que sólo tienen una correspondencia indirecta con las construcciones ostensivas de las figuras geométricas⁷⁸. Sin embargo, si

⁷⁸ Cf. GÓMEZ CAFFARENA, E., La filosofía de la matemática de Kant basada en el número como esquema (obra pendiente de publicación). En este trabajo el autor afirma que el abandono de toda matemática numeral, a favor de una geometría exclusivamente ostensiva, euclídea, lleva hacia una concepción de toda intuición matemática como exclusivamente espacial y subraya la importancia que tiene el “Esquematismo” en el pensamiento kantiano: “El concepto necesita el esquema como «tercer término» que permita que lo sensible sea subsumido bajo lo inteligible para lograr, así, que los juicios sean sintéticos. El esquema matemático que consiste en una determinación del tiempo de la que emana el número como «unidad de síntesis de la diversidad de una intuición homogénea» tiene la capacidad y la necesidad de producir imágenes de los conceptos. Ahora bien, esas imágenes que se producen gracias a la intuición pura espacial, mediante la cual el tiempo logra tener representación y objetividad, no tienen por qué ser exclusivamente ostensivas (figuras) sino que pueden ser también –e incluso exclusivamente-

excluimos la posibilidad de estas construcciones, esto invalidaría, a mi juicio, las corrientes posteriores de fundamentación de la matemática que partieron de la intuición kantiana del tiempo, ya que, en el capítulo del “Esquematismo”, Kant estableció que sólo el tiempo está capacitado para ser la base intuitiva sobre la que la Imaginación Trascendental determina los esquemas, sin los cuales no puede alcanzarse en matemáticas ningún juicio sintético *a priori*, además, allí mismo definió al número como el esquema de toda cantidad (magnitud) y expuso la imposibilidad de alcanzar ningún concepto constructo geométrico sin esquema.

Si a esta concepción le restamos el valor de *a priori*, esta *determinación de la intuición temporal como esquema numeral, capacitado para producir imágenes espaciales en forma de figuras o de signos*, es importante para la tesis de este trabajo, ya que sirve de *garantía filosófica* para afirmar con Bohr que la física cuántica es una teoría que describe *completamente* la realidad física a escala atómica; sólo que el ideal descriptivo ha cambiado y ahora sólo pueden usarse representaciones simbólicas en nuestra descripción del mundo. Veamos cómo.

Kant distingue entre dos tipos de intuición espacial: la intuición empírica, que es sensible y pasiva, y la intuición pura, también sensible pero activa. La primera se refiere al espacio de nuestra percepción, pues se forma a partir de los datos sensibles que recibimos directamente del exterior a través de nuestros sentidos y de nuestra capacidad de percibir (“observaciones”); es aquélla que permite formarnos imágenes de tipo dimensional de los objetos en el espacio, ya que coincide con el espacio tridimensional de la geometría euclídea. En cuanto al espacio como intuición pura, o forma pura del sentido externo, es aquél que sirve de posibilidad gnoseológica de todos los fenómenos externos, es decir, materiales; sin embargo, él no es un espacio material, empírico o fenoménico: es sensible aunque no perceptible⁷⁹, pues es algo que

simbólicas (signos numéricos o algebraicos) como puso de manifiesto el pasaje de la Doctrina Trascendental del Método (A-717=B-745)”. GÓMEZ CAFFARENA, E., La filosofía de la matemática de Kant basada en el número como esquema, pp.38-39. De modo que, E. Gómez Caffarena basa la filosofía de la matemática de Kant en el “Esquematismo”, para que los juicios matemáticos no pierdan su valor de síntesis *a priori*, nos encontramos con que el número es el esquema matemático, que, como tal, es una determinación del tiempo, lo cual nos lleva a que no puede haber Geometría sin número, es decir, sin esquema temporal/numeral, pues, además, dicho esquema tiene “la capacidad y la necesidad” de producir imágenes espaciales (figuras o signos).

⁷⁹ Aunque todo lo empírico tenga que ser sensible, no todo lo sensible es empírico o perceptible. La diferencia entre “sensible” y “perceptible” la realiza Kant en la Estética Trascendental y está presente en toda la Crítica.

pertenece a la sensibilidad activa y *a priori* del intelecto humano, pero está fuera de aquella pasividad, propia de la percepción empírica, que es siempre *a posteriori*.

Ahora bien, ¿coinciden estos dos tipos de espacio; son de naturaleza homogénea? Cuando Kant escribió los “Principios Metafísicos de la Ciencia de la Naturaleza” presentó a la intuición pura del espacio como algo homogéneo al espacio empírico, material, para encontrar un fundamento metafísico para la física newtoniana; de ahí que la lectura tradicional, convencional u ortodoxa, de la filosofía kantiana asuma que existe una intrínseca relación entre ambas, de modo que en el Idealismo Trascendental encontraríamos los principios metafísicos que garantizan la validez de la física clásica como ciencia universal y necesaria, ya que sus juicios tienen el valor de síntesis *a priori*. Por lo tanto, una vez superada la física clásica por otras teorías y demostrada la posibilidad matemática de otras geometrías distintas de la geometría euclídea, se concluye que Kant fracasó y que su filosofía ha quedado obsoleta.

Sin embargo, muchos autores⁸⁰, que no siempre han sido escuchados, se han esforzado en declamar que en todos los trabajos de la época crítica de Kant, excluyendo los “Principios Metafísicos de la Ciencia de la Naturaleza”, se afirma que el mundo sensible, al que pertenece el espacio empírico-material, y el mundo inteligible, al que pertenece el espacio como forma de la intuición, son *heterogéneos* y aquello capaz de homogeneizarlos en un juicio sintético es el *esquema*, un “tercer elemento” que hace homogéneo el carácter inteligible del concepto con la naturaleza sensible de las intuiciones interna y externa. Es este esquema, y no la coincidencia del espacio empírico con el espacio como intuición pura, lo que garantiza en el Idealismo Trascendental la posibilidad de juicios sintéticos *a priori* en la Matemática y en la Física.

Pero, dejando a un lado si Kant debió o no profundizar en este rasgo de su pensamiento, que sólo apuntó, es decir, sin que deba pronunciarme por si mi propuesta es o no es kantiana, la cuestión que me ocupa es si tales consideraciones acerca del tiempo, estando como de hecho están sobradamente justificadas y argumentadas al margen de la Crítica de la Razón Pura, pueden servir de garantía gnoseológica a las reiteradas afirmaciones de Bohr acerca de la completud de la física cuántica como una

⁸⁰ Como son Jaakko Hintikka, Charles Parson, Arthur Melnick, J. Michel Young, Carl J. Posy y Gordon G. Brittan Jr., entre otros. Cf. POSY, CARL J. (ed.), Kant's Philosophy of Mathematics. Así como también: BRUNSCHVIG, L., Les étapes de la philosophie mathématique.

teoría realista con contenido intuitivo; esto es, una teoría capacitada para ofrecer una descripción física del mundo, a pesar del “fracaso” de la descripción espacio-temporal, del lenguaje cualitativo de la Física y de los modelos e imágenes pictóricas, ostensivas o figurativas.

En otro epígrafe anterior expuse cómo en la Estética kantiana se fundamenta la matemática en ambas intuiciones, subordinando la espacial a la temporal, la Geometría a la Aritmética; mientras que la Analítica busca una base firme para la Física en los conceptos o categorías del entendimiento, causalidad, unidad, sustancia. Pero no mencionaré ni seguiré a Kant en esta segunda fase de su discurso para fundamentar la Física, pues, como he dicho, la mía no es una propuesta kantiana; pues ni reconozco el carácter “a priori” de las intuiciones ni comparto su método transcendental, que, por su parte, ni Bohr reconoció; así como tampoco necesito recorrer el mismo camino que Kant trazó para la Estética transcendental y el Esquematismo cuando elaboró su fundamentación del conocimiento físico. Es decir, el principio de causalidad, el de permanencia o la objetividad que Kant recupera y justifica en su Analítica Transcendental para la ciencia física no tienen ningún valor en la filosofía de la complementariedad, ya que Bohr ha revisado las nociones fundamentales de la física y las ha redefinido de tal modo que ahora tienen su propia justificación en el nuevo marco conceptual: en él no veo que haya lugar alguno para la Analítica de Kant.

He aquí el significado del título de este epígrafe: el “giro secante” en torno al esquematismo de Kant. Si bien me he aproximado a él, trazando un círculo, no he llegado a cerrarlo, adentrándome en la doctrina kantiana, sino que, justamente, en esta fase de su discurso me distancio de él, del mismo modo que una línea secante pasa por un punto del círculo, al cual toca, pero a partir del cual también se separa alejándose linealmente de él.

No obstante, si el fundamento del conocimiento físico no son las categorías kantianas, ¿cuál es el camino que sigue la física para conectar las matemáticas de la teoría con la realidad física?

La solución que propongo es la siguiente: si la intuición temporal es la que fundamenta la matemática y a ella se subordina la intuición espacial, como la responsable de la representación ostensiva en el espacio, tenemos que la capacidad analógica de los conceptos descriptivos de la física (las nociones espacio-temporales), a la que se refiere Bohr, se corresponde con la capacidad que posee la intuición temporal de relacionarse y ofrecer modelos espaciales. De modo que es esta intuición, y no la espacial, la que establece la conexión entre la exterioridad del mundo natural y nuestro conocimiento de ella.

El nuevo modelo de inteligibilidad, que propone Bohr, ha de pasar por este tipo de intuición, como vía principal para el conocimiento de la realidad física, y fundamentar la validez de la descripción mecánico-cuántica en la capacidad que tiene el tiempo gnoseológico de conectarse con la intuición espacial para ofrecer un modelo material o representación simbólica con características espaciales, las cuales satisfacen las necesidades de nuestro intelecto para entender en términos espacio-temporales un mundo, cuyas propiedades físicas, dadas en estos términos, no se ajustan exactamente a las características del espacio y del tiempo de nuestra percepción y que coincidirían con los de la física clásica, pero no lo hacen con los de la teoría cuántica.

¿Podemos estar seguros de que la intuición temporal sea condición de posibilidad de los objetos cuánticos? Aquello que sí es seguro es que el espacio de nuestra percepción y sensibilidad, el espacio gnoseológico, no lo es. Si ni el espacio ni el tiempo gnoseológicos tienen además un carácter ontológico, entonces, la física cuántica carece por completo de contenido intuitivo y, por lo tanto, de validez en tanto teoría realista, pues no estaría aprehendiendo nada de la realidad.

Dicho de otro modo, si el tiempo tampoco sirve como intuición, en tanto condición de posibilidad del objeto y de nuestra sensibilidad como capacidad de representación, la crítica y la oposición de Einstein a la física cuántica, como teoría completa de la realidad física, tendría una justificación filosófica; pero, si es cierto que el tiempo conserva su valor de intuición, como elemento conectivo entre teoría y experiencia, se tendrá que dar la razón a Bohr porque la intuición temporal es capaz de fundamentar este tipo de conocimiento sobre la realidad que no necesita modelos pictóricos, descripciones precisas y exhaustivas en el espacio: espacialmente isomórficas con la realidad del mundo físico.

Sin embargo, esto implica la necesidad de responder a otra cuestión: ¿es la intuición temporal capaz de ofrecer, al menos, las representaciones espacialmente simbólicas de la realidad, que toda teoría física y realista, en toda regla, necesita para describir y entender la materialidad del mundo? O dicho de otro modo: ¿es la representación temporal condición de posibilidad del conocimiento?

En el punto 7.3 propondré cuáles son las condiciones de posibilidad del mundo de objetos microfísicos, de la materia cuántica; a continuación fijaré aquellas otras condiciones, las de nuestra capacidad de conocer que, a partir de esta nueva revolución epistemológica del conocimiento físico, hemos de reconstruir y diferenciar de aquellas otras que manejaba el marco

clásico, si queremos hacer inteligible la nueva información sobre el mundo y la materia, que nos ha traído la física cuántica.

7.2) Las Condiciones Gnoseológicas de la Complementariedad: Condiciones de Posibilidad del Conocimiento Sobre la Región Atómica

La tesis principal por la que he llevado a cabo todas las anteriores argumentaciones, que he venido presentado en este trabajo, y la que defenderé en todas sus facetas, a partir de ahora, es la siguiente: *la intuición temporal es el determinante del objeto cuántico, tanto en su dimensión física como gnoseológica*. Es decir, es el único elemento que define y organiza las condiciones de posibilidad del objeto y las condiciones de posibilidad de nuestro conocimiento, respecto a ese objeto. Es el único elemento que coincide en los dos niveles, dado que el espacio sólo pertenece al último: lo necesitamos como condición de nuestra sensibilidad, para entender y representar, pero no configura la realidad de los objetos cuánticos.

Ahora bien, si el tiempo constituye la única “intuición” que sigue siendo válida en mecánica cuántica, se han de comprobar los siguientes puntos.

1) Si el tiempo cumple o no los requisitos filosóficos para considerarse intuición en tanto que condición gnoseológica o condición de posibilidad del conocimiento humano.

2) Si el tiempo cumple los requisitos físicos en tanto que condición de posibilidad del objeto: el marco ontológico de la mecánica cuántica y el papel del *tiempo físico*, como parámetro, dentro de la teoría.

3) Si ambos tipos de condiciones, requeridas por el tiempo, (las del objeto y las del conocimiento) son congruentes entre sí a la hora de posibilitar una representación del mundo con validez objetiva. Es decir, si hay una correspondencia entre elementos objetivos de la realidad externa y elementos subjetivos de la teoría, la cual determina el contenido intuitivo de la mecánica cuántica como descripción física de la realidad, garantizada por un “realismo simbólico”.

En relación con esto último, he de recordar que opongo la expresión “representación ostensiva” a “representación simbólica”, o bien “realismo clásico” a “realismo simbólico” por lo siguiente: la representación ostensiva, en la que se basa el realismo clásico, es una representación “manifiesta”; éste es el significado del término “ostensivo”. Dicho de otro modo, es una representación de los objetos materiales

(realidad externa) donde se manifiestan, ellos y sus propiedades espacio-temporales, tal cual son en dicha realidad; por esto último es que puede hablarse de “representación geométrica”, porque se incluye la espacial. En cambio, en la representación simbólica no se manifiestan dichas propiedades tal cual son porque *no son*; no existen en la realidad; no son propiedades reales: no le pertenecen al objeto material, a la realidad física exterior tal cual es; esto es sólo un supuesto del marco conceptual clásico. En el marco cuántico se ha de aceptar, para mantener el sentido de la física, que las propiedades espacio-temporales de la materia, en tanto características “geométricas” o métricas, en el marco euclídeo, son propiedades fenoménicas, que sólo pueden representar a la realidad física externa de manera simbólica.

a) Distinción entre espacio y tiempo: su asimetría en tanto intuiciones

Antes de argumentar mi tesis sobre la intuición temporal como puente entre la teoría cuántica y la realidad microfísica en tanto condición de posibilidad de la sensibilidad y de los objetos microfísicos, me detendré en algunas consideraciones sobre el tiempo.

No se debe identificar el movimiento de un cuerpo, que siempre ha de presentarse como un fenómeno espacio-temporal, con el transcurso temporal en sí, ya que éste sí se puede experimentar al margen del espacio y de la materia.

En realidad, éste es el único modo que tenemos de “representárnoslo”⁸¹, es decir, a través de nuestra capacidad interna de captación del tiempo, pero evitando siempre caer en la espacialización de éste, ya que esto nos llevaría al siguiente error. Espacialización del tiempo: tiempo *moviéndose* en el espacio, materializado (corporeizado) en cualquier suceso, desde la clásica línea de puntos, vector o “flecha del tiempo”, hasta la imagen del proceso de deterioro de la materia, o cualquier otro cambio de ésta. Aunque éste haya sido, en realidad, hasta ahora la manera cómo la ciencia medía el tiempo:

⁸¹ El término “representación” parece implicar siempre una representación espacial (pictórica, ya que con él se alude a la posibilidad de referirnos a algo por medio de figuras o palabras); de ahí que hablar de una “representación del tiempo” pueda suponer ya una contradicción. Sin embargo, sólo uso dicho término en su acepción de “ser símbolo de algo” como medio para la conceptualización de aquello (y para su entendimiento).

“Un recuento del tiempo puramente psicológico no basta para determinar lo que entendemos por «tiempos iguales», pues sabemos por experiencia que tal estimación no da lugar a proposiciones exactas u objetivas. Por lo tanto, la medición del tiempo en ciencia, con la ayuda del concepto de movimiento –y preferiblemente de movimiento periódico- se reduce a la medición del espacio”⁸².

Incluso, Einstein espacializó el tiempo en su teoría de la relatividad cuando lo definió como una coordenada más de la estructura del campo y de esta forma mitigó su carácter de sucesión en favor de una simultaneidad temporal, donde los distintos intervalos temporales pueden coexistir, como ocurre con las regiones espaciales; en este sentido, puede decirse que para Einstein era mucho más importante la simultaneidad temporal, en tanto coexistencia de los intervalos temporales, que la sucesión. Einstein no abolió el término “simultaneidad”, sólo lo relativizó, y, al no poder considerar simultáneos dos sucesos, lo que hace es renunciar al tiempo absoluto: el tiempo es relativo y sólo tiene existencia objetiva cuando se le trata como una coordenada más dentro de su noción de “campo”. Cuando Einstein dice “el tiempo es una ilusión” se refiere a aquel tiempo absoluto, que la mecánica cuántica volvió a introducir en la física.

Todo cambio espacial o movimiento de la materia necesita del tiempo para poder realizarse; pero buscar una representación del tiempo en base a una imagen dinámica de la materia o de él en el espacio (material o espacial) es un *prejuicio visual*, es pretender dar una imagen visual del tiempo, algo que es imposible porque el tiempo no se puede “ver”: el tiempo no se puede percibir directamente a través de ninguno de nuestros órganos sensitivos externos; sólo puede medirse de esta forma. Así pues, el carácter intuitivo de éste no puede estar en las “imágenes” que nos ofrecen nuestras percepciones externas; pero, si se insiste en buscar un modelo sensitivo-externo del tiempo es preferible compararlo con la percepción auditiva antes que con la visual, ya que, a pesar de que un modelo intuitivo temporal no se ajusta rigurosamente a ninguna de nuestras sensaciones externas, al menos la naturaleza del tiempo se percibe con menos contaminación material a través de un sonido que de una visión: los *tempos* en música, las frecuencias de las ondas sonoras..., necesitan de un medio material para producirse y transmitirse, pero la naturaleza de su percepción auditiva, en tanto que “sucesión de sonidos” más o menos armónicos, no permite un modelo visual-material-espacial de la música en sí.

⁸² SCHLICK, M., Filosofía de la naturaleza, p. 60. Ediciones Encuentro, Madrid, 2002.

Por tanto, un modelo intuitivo basado en el tiempo y no en el espacio no se puede visualizar espacialmente, pero sí puede ser intuitivo y con contenido físico, aunque de un modo diferente al modelo espacial. A partir de ahora la intuición no pertenecerá en exclusiva al mundo de nuestras *percepciones sensitivas externas*: algo puede ser intuitivo sin ser visual, auditivo, táctil, gustativo u olfativo, aunque puede seguir considerándose “sensitivo” siempre y cuando se aclare que se está hablando de un *sentido interno* y no externo; el cual aporta a nuestro conocimiento modelos formales del mundo material.

Ahora bien, lo que está en juego es si los modelos formales, basados en el tiempo, pueden ofrecer modelos materiales de la realidad aunque sólo sean simbólicos. Mientras que Einstein, defendiendo el postulado de localidad como fundamento de su criterio ontológico, se empeña en hacer del espacio, es decir, de la representación ostensiva o geométrica de los sistemas físicos, el fundamento del contenido físico de una teoría, Bohr reniega de las nociones espacio-temporales como fundamento de aquél⁸³ y propone en su lugar una fundamentación más abstracta y sin connotaciones ontológicas, esto es, el uso analógico de tales conceptos, propuesto por el principio de correspondencia.

Así, puede verse que en la Polémica se contraponen dos principios filosóficos diferentes, dos tipos de fundamentación intuitiva: el fundamento espacial de Einstein, que hunde sus raíces en la ontología convencional del materialismo y realismo clásico, y aquella que propone Bohr, analógica o simbólica, si es que puede llamarse “fundamentación”, carente no sólo de connotaciones ontológicas (al menos de tipo clásico), sino también de garantías gnoseológicas. Sin embargo, demostraré que es susceptible de ser ampliada hasta el ámbito gnoseológico, con el fin de ofrecer una respuesta concreta a las objeciones de Einstein.

Este análisis más profundo de las implicaciones gnoseológicas de la complementariedad me ha llevado a proponer a una “fundamentación temporal” del principio de correspondencia, la cual está en consonancia con el realismo no-clásico que postula Bohr, ya que implica un tipo de descripción física, no basada en el representacionismo pictórico o geométrico de la realidad, sino en una “representación aritmética” de ésta, si es que se da el caso; también conlleva un materialismo cuántico y una ontología, donde no hay *referencia espacial exacta o isomórfica* de los

⁸³ En esto Bohr estaba equivocado y Einstein tenía razón: el contenido físico de una teoría ha de basarse en ambos tipos de intuición, o, al menos y en principio, en una de ellas.

conceptos mecánicos a los sistemas físicos⁸⁴. Pero, el primer paso de esta argumentación está en justificar la asimetría del espacio y del tiempo como intuiciones, aunque no como parámetros físicos de la medición.

Pocos autores, si es que hay alguno, podrán negarle a Kant que toda teoría del conocimiento conlleva una fundamentación intuitiva, en tanto que dicho conocimiento necesita de algún tipo de intuición intelectual, espacial o temporal para justificarse a sí mismo.

Por un lado, las *propiedades físicas* de los objetos materiales se definen a partir de su extensión (figura) y movimiento (duración), las cuales son características espacio-temporales; por otro lado, nuestro entendimiento, la capacidad de ordenar, aprehender y comprender, está subordinado a las intuiciones del espacio y del tiempo. Por tanto, el espacio y el tiempo gnoseológicos, como parámetros intuitivos, y el espacio y el tiempo objetuales, como parámetros físicos, no tienen por qué ser lo mismo y coincidir en sus características o rasgos distintivos, adecuándose, perfectamente, el uno al otro; aunque hayan de relacionarse de alguna forma para que el conocimiento adquirido del mundo físico nos resulte inteligible y posea un contenido empírico veraz y realista. Esta relación la analizaré más adelante; de momento, he de centrarme en exponer que, a pesar de que Bohr no distingue entre espacio y tiempo cuando habla del fracaso de esta descripción, separar dichas nociones, en tanto intuiciones, y defender su asimetría gnoseológica no contradice su vinculación física ni ningún rasgo esencial de la complementariedad.

Pues bien, el representacionismo pictórico de la física clásica está basado en la intuición espacial, en tanto que aquél expresa un orden de coexistencia lógico entre relaciones espaciales; en cambio, el representacionismo simbólico, que propone Bohr desde su tesis del uso analógico de los conceptos, sólo puede fundamentarse desde la intuición temporal, ya que la espacial ha fallado, definitivamente, como la base de toda representación directa o exacta a través de modelos visuales o espacialmente ostensivos.

He dicho ya que no es lícito asignar características espaciales a un modelo temporal, pues queda claro que tiempo y espacio son diferentes y no tiene justificación identificar las características de ambos. Ahora bien,

⁸⁴ Acerca de este aspecto, en el apartado 7.3, se formulará la siguiente pregunta: ¿Se puede ir más allá de la complementariedad y asignarle un marco ontológico? ¿Este marco ontológico se podría construir sobre la base de la intuición temporal (como su fundamento ontológico), sustituyendo a la intuición espacial sobre la que se levanta el marco clásico del realismo científico tradicional (la ontología clásica)?

¿cuáles son estas características, que posee el tiempo, que le permiten ofrecer un modelo intuitivo de la realidad? El abuso de aquella socorrida *materialización del tiempo*, al querer representarnos la dimensión temporal, es la causa de la confusión y el aturdimiento que padecen los físicos cuando buscan la respuesta a nuestra anterior pregunta o cuando intentan explicarse a un nivel *meta-físico* la presencia de h en las fórmulas de la física cuántica (buscando la comprensión y la explicación del fenómeno físico). En cambio, los matemáticos no suelen incurrir en este error, debido, quizás, a que su disciplina se desarrolla en un nivel más abstracto, razón por la cual no se sienten tan vinculados como los físicos a la realidad material.

Por tanto, la intuición no debe fundamentarse en la visualización, es decir, en las propiedades espaciales de los objetos, como proponía Einstein, ya que la espacialidad de la física cuántica no es directamente accesible a nuestro pensamiento y con él a nuestra comprensión y explicación del mundo; de ahí que la representación geométrica no deba ser la base de la descripción física sino la representación aritmética, fundamentada intuitivamente en el tiempo.

En definitiva, si se ha de dar prioridad gnoseológica a alguno de los dos, ésta se la lleva el tiempo sobre el espacio. No obstante, si de lo que se está hablando es de la característica temporal que todo movimiento conlleva en el plano material o físico (realidad física, exterioridad), no se debe olvidar que el eje sobre el que gira toda la digresión es el movimiento de la materia (fenómeno espacio-temporal por definición, que se da en el marco del espacio y del tiempo) y no únicamente sobre el tiempo; no puede ignorarse su característica espacial: en el plano físico ambos van unidos. Pero una cosa es el espacio y el tiempo físicos (como parámetros físicos de los fenómenos, medidos en metros y segundos) y otra el espacio y el tiempo gnoseológicos o “formas de intuición”, que no tienen por qué ajustarse a las características fácticas que les asigna una teoría física en concreto.

Dichas “formas de intuición” también podrían llamarse, para evitar la confusión con la terminología kantiana, donde se las vinculó a intuiciones puras o *a priori*, “parámetros intuitivos” o “medidas de la intuición” porque, en este caso, ya no se usarían para medir los metros y los segundos, sino el grado de comprensión y de explicación que la teoría nos ofrece de la realidad física, tal y como Heisenberg define el concepto de “contenido intuitivo”. Además, esta denominación servirá para unificar ambos criterios: cuando hablo de la intuición espacial o temporal y cuando hablo del carácter intuitivo de una teoría o de su contenido físico.

Por su parte, Einstein ni se plantea la idea de hablar de intuición sin hablar de representación espacial y es que toda la argumentación anterior carece de sentido si se cae en la trampa de la espacialización del tiempo al identificarlo con las distintas manifestaciones físicas que de él se nos presentan a través de la idea de movimiento. En el pensamiento de Einstein está muy arraigada la vinculación del espacio con el tiempo, pero, que en el plano físico marchen juntos no implica que sean una única realidad, inseparable, en su faceta gnoseológica y que tengan las mismas características (epistemológicas). Más aún, si fuera lícito fundir ambos, sería más correcto hablar de “temporalización del espacio” que de “espacialización del tiempo”, por mucho que les pese a algunos físicos, porque de no hacerlo así, resultaría muy difícil no inferir de ello que “el tiempo sea una ilusión” o, esto mismo, que no existiese; lo cual es un absurdo.

Ahora bien, ¿qué tiene que ver todo esto con la completud y la comprensión, que puede obtenerse, de la física cuántica? ¿Y cuál es su relación con el problema del carácter intuitivo de los fenómenos atómicos? Pues que “completud” e “intuición” están íntimamente relacionadas, como ya he explicado, en la crítica de Einstein, que se reduce a lo siguiente: la mecánica cuántica es una teoría completa en todos los sentidos excepto en uno; su incompletud se debe a que no es una teoría intuitiva y no es intuitiva porque no existe conexión entre teoría y realidad, lo cual se manifiesta en que no describe “objetivamente” la realidad, esto es, no ofrece una representación de los objetos como entes autónomos localizados, y separados, en el espacio y en el tiempo; de aquí su crítica acerca de la carencia realista de la mecánica cuántica. Para Einstein una teoría ha de ajustarse al principio ontológico, que nos dice cómo es la realidad; pero, como también se ha visto, para Bohr el proceso es el contrario: la teoría nos dice cómo es esa realidad, por tanto es ella la que se “ajusta” a la teoría.

Pero, además, ¿qué entendemos por intuitivo y qué es lo que debemos entender (o esperar) de este término? ¿Podemos llegar a comprender y considerar intuitivo a un fenómeno que transgreda la rigidez de las leyes del espacio, esquivando y huyendo de toda representación pictórica inequívoca? -Posiblemente, sí- ¿Podemos considerar intuitivo a este fenómeno que si bien no es visualizable en el espacio, es *exclusivamente* representable temporalmente? -No- No, si nos aferramos únicamente al carácter temporal de los símbolos matemáticos que la teoría física contiene, pues, entonces, no saldríamos de una concepción meramente matemática, sin poder fundamentar la posibilidad, que de hecho

existe, de la descripción física. No obstante, *sí* podemos hablar de intuición cuando, basándonos en la naturaleza temporal del fenómeno, y añadiéndolo a ésta, construimos una imagen espacial a través de la posibilidad de representación simbólica o analógica, nunca más pictórica, que nuestra experiencia interior del tiempo (intuición) nos ofrece como un símbolo de la realidad⁸⁵.

Aunque pueda parecer que tal opción tampoco sería admitida por Bohr, ya que él nunca distinguió entre espacio y tiempo al hablar del fracaso de la descripción espacio-temporal, he mostrado cómo dicha tesis, acerca de la asimetría de las intuiciones espacial y temporal, si bien no fue reconocida por Bohr no contradice las ideas del físico danés. Puesto que, cuando afirma que fallan nuestros conceptos, basados en nuestras percepciones ordinarias del espacio y del tiempo, sin duda se refiere a la forma cómo ambos se relacionan en el marco clásico para construir un modelo pictórico de la realidad e, incluso, donde se habla de un tiempo físico que, además, ha sido espacializado. Por tanto, es la espacialidad, como forma de nuestro entendimiento para ordenar la realidad, la que ha tocado fondo; es decir, el espacio gnoseológico, el espacio como forma de intuición, ha fallado. No obstante, nada dice (ni para bien ni para mal) del tiempo gnoseológico, que es el tiempo como intuición interna.

Este punto de la reflexión es el que analizaré a continuación, partiendo de los argumentos, que acabo de exponer, a favor del tiempo en tanto intuición y como respuesta a la cuestión de si tales ideas son aplicables al pensamiento de Bohr como complemento gnoseológico a su doctrina esencialmente epistemológica.

b) El simbolismo de la representación en la descripción cuántica

Los argumentos expuestos en el apartado 7.1 demuestran la importancia de los dos tipos de intuiciones, la espacial y la temporal, para llevar a cabo este ideal y el modelo de inteligibilidad del realismo racionalista: el tiempo, como intuición, permite matematizar los conceptos físicos y la intuición espacial asegura su capacidad explicativa. No

⁸⁵ Este símbolo lo construimos en base a ciertas reglas determinadas por la teoría en cuestión. De ahí que del esquema matemático de la teoría extraigamos la imagen (espacio-temporal) del mundo físico, esto es, su descripción y comprensión: contenido intuitivo. La intuición garantiza la descripción y la comprensión y, a través del lenguaje, la comunicación.

obstante, la forma cómo éstas se relacionan entre sí es distinta en el modelo de inteligibilidad de la física clásica y en el de Bohr, dando lugar a otra manera de entender no sólo el mundo, sino también la conexión de las teorías con él.

Ciertamente, no podemos prescindir de las intuiciones intelectuales en nuestra indagación sobre el mundo; sólo que, **en física cuántica, nuestra intuición espacial fracasa como condición de posibilidad del objeto, como elemento objetivo y, únicamente conserva su valor psicológico como elemento subjetivo de nuestro conocimiento.** Únicamente el tiempo, y no ya el espacio, conserva, en la ciencia contemporánea, su carácter intuitivo como elemento objetivo del mundo sensible y como elemento subjetivo de nuestra sensibilidad; es el único puente, que sigue en pie, entre la realidad y la teoría. Ahora bien, la intuición temporal tampoco es intuición pura, ya que, a pesar de que puede ser condición de posibilidad del objeto, no tiene valor a priori como elemento de nuestro conocimiento, sólo mantiene el valor psicológico de elemento subjetivo de nuestra sensibilidad, tal y como argumentaré a continuación.

El primer factor a favor de esta tesis, que aquí defiendo, es que las condiciones epistemológicas de la física cuántica nada dicen en contra del tiempo gnoseológico y de su relación con el tiempo físico; además, la temporalidad es una intuición mucho más flexible que la espacial (siempre confinada entre los límites de las características euclídeas), en el sentido de que sólo implica una sucesión, proceso o duración de un tipo u otro. Si el tiempo es condición de posibilidad del objeto y si, como Hilbert y Brouwer defendieron, es la intuición temporal la que sirve de fundamento a la matemática, entonces, tenemos que esas matemáticas, que son el núcleo de toda teoría física y que adquirieron un papel aún más importante en el formalismo cuántico, son “intuitivas”.

Como se ha visto anteriormente, algunos matemáticos, acostumbrados como están a hacer abstracción de todo lo material (del mundo físico), sobre todo en aritmética y en álgebra, defienden que los símbolos algebraicos (matemáticos) son *construcciones temporales*, cuya aplicabilidad a la realidad viene garantizada por su temporalidad: enclave de la relación mente-cuerpo, interioridad y exterioridad, realidad física y pensamiento humano.

El tiempo es el único rasgo que ambos (niveles) tienen en común, es nuestro *único puente directo con la realidad*; todo lo demás se deriva de él, incluso la espacialidad, ya que ésta sólo se da, si es que se da, de forma primaria (o directa) en la materia, pero no en el pensamiento (mente, o

como queramos llamarlo). Éste (el pensamiento) sólo se puede hacer una idea aproximada, o *simbólica*, de lo que es el espacio para la exterioridad de los cuerpos (extensos por definición). No hay espacio en nuestro pensamiento; incluso para Kant sólo es una idea derivada del tiempo⁸⁶, cuyo uso “material” permite construir una *imagen espacial* de los fenómenos.

De modo que el *simbolismo* siempre ha estado presente en toda “representación espacial” y, por tanto, aunque este símbolo, construido por analogía con la realidad, sea irrepresentable tal cual es respecto del espacio, pero no del tiempo, sí nos resulta accesible. El acceso se realiza de la siguiente forma: el *símbolo de Bohr* está indefinido espacialmente, pero puede ser definido desde el concepto de tiempo como lo hace la matemática cuando define sus conceptos numéricos.

No obstante, la física cuántica es intuitiva no porque nos aporte una “representación temporal” de los fenómenos, si es que se le puede llamar “representación”, ya que sólo con esto no se podría construir un modelo de la realidad (a lo sumo, un modelo formal, pero esto no es lo que se está buscando), sino que es intuitiva porque además de aquella representación temporal, y gracias a ella, ofrece la posibilidad de representarnos espacialmente los fenómenos y, por tanto, la construcción de un modelo material (o físico) que, aunque sea simbólico, también es intuitivo: temporalmente intuitivo de forma directa, como elemento objetivo y subjetivo de la realidad y del conocimiento (condición necesaria, pero no suficiente), y espacialmente intuitivo de forma simbólica y derivada de la anterior, es decir, sólo como elemento subjetivo indispensable a nuestro conocimiento que, al no coincidir, en su estructura, con la realidad, como condición de posibilidad del objeto, sólo puede usarse de manera simbólica.

Si las matemáticas son “intuitivas”, la física cuántica es “matemáticamente intuitiva”, pero es cierto que esto no es suficiente, pues también ha de ser “físicamente intuitiva” y, por tanto, se ha de justificar la conexión de las matemáticas con la realidad para que se dé la descripción o explicación física y no sólo la descripción o predicción matemática. El análisis de Bergson, sobre el papel de la intuición espacial en el conocimiento científico, nos revela la necesidad de incluir de nuevo la espacialidad, por ello es necesario que pueda fijar las características de la intuición temporal, para comprobar si ésta puede, o no, ofrecer la posibilidad de recuperar, *parcialmente*, la validez de la espacialidad y su capacidad representativa y descriptiva de la realidad física.

⁸⁶ Todo proceso mental es un proceso temporal.

Es decir, en la actualidad, el tiempo ha de realizar las funciones que en otra época, en el marco conceptual de la física clásica (e incluso en la postura intelectual que defendió Einstein), le correspondieron al espacio: el espacio plano de la geometría euclídea era tanto espacio físico como espacio gnoseológico y, gracias a esta coincidencia, la Física ofrecía descripciones geométricas de los objetos materiales y de su movimiento en el espacio euclídeo. Tales descripciones no son posibles en física cuántica a no ser que renunciemos a su carácter figurativo, ya que en la realidad no encontramos tales modelos, imágenes o formas geométricas de la materia cuántica; sólo algo parecido: “asintóticamente parecido”, dice Bohr; aunque él nunca explicó en qué consistía este tipo de semejanza, ni cómo se consigue, mi propuesta es que el tiempo como intuición interna sí puede hacerlo.

Si asumimos con Bohr que la física cuántica es una teoría correcta y completa, que describe físicamente la realidad del mundo microfísico, indudablemente, se ha advertir que la “imagen del mundo físico” ha cambiado; pero, a la vez, y, además, se ha de conseguir garantizar que la *nueva imagen* está tan comprometida con el realismo como lo estaba la anterior.

La solución que propongo es la siguiente. Según los formalistas e intuicionistas, el conocimiento matemático puede emplear dos tipos de imágenes: la *imagen ostensiva*, esto es, la representación geométrica de una figura en el espacio de nuestra sensibilidad, y la *imagen simbólica*, es decir, el signo o guarismo matemático con el que designamos algo sin necesidad de espacializarlo⁸⁷.

El ideal descriptivo de la física clásica era ofrecer imágenes del primer tipo, ostensivas del mundo y de los objetos; el nuevo modelo de inteligibilidad, que propone Bohr para recuperar el valor descriptivo de la Física, puede tener un fundamento filosófico si, y sólo si, sus cimientos se sostienen sobre el carácter simbólico del segundo tipo de imágenes. Pues, a partir de éste se podría realizar la *traducción*, vía “principio de correspondencia”, al lenguaje de las imágenes pictóricas: modelos geométricos, que Bohr pretendía mantener para garantizar el carácter intuitivo de una teoría así, donde fracasan los ideales tradicionales de descripción física. El resultado de esto es, como ya se vio, un tipo de

⁸⁷ Sirva como ejemplo que la imagen figurativa de una parábola matemática es una línea curva trazada sobre un eje de coordenadas y su imagen simbólica es una ecuación de segundo grado.

representación del mundo físico, no clásica, que se define por el simbolismo y no por la espacialidad.

¿Puede este tipo de representación simbólica mantener un compromiso ontológico con la realidad, que le lleve más allá del instrumentalismo físico?

La tesis de este trabajo es que tal afirmación y deseo de Bohr sólo puede llevarse a cabo y justificarse si se defiende el carácter *realista* y *objetivo de la intuición temporal*, a pesar de ser *fenoménica* en tanto *propiedad física, métrica*.

c) El principio de correspondencia bajo la intuición temporal

Al final del apartado 7.1 planteé dos interrogantes: ¿es el tiempo condición de posibilidad de los objetos cuánticos? y ¿es el tiempo condición de posibilidad del conocimiento físico? Antes de continuar respondiendo a la segunda pregunta, por la que he empezado la argumentación, me adelantaré al orden escrito de la exposición para plantear, en cuanto a la primera pregunta, algunos puntos de reflexión con respecto al tiempo y al indeterminismo físico.

Primeramente, he de aclarar que el principio de indeterminación de Heisenberg *no es el responsable directo* de estos problemas sobre el contenido intuitivo, por ello no importa que haya indeterminación física del espacio y del tiempo; el responsable de todo esto es la violación del principio de separabilidad espacial de los sistemas físicos⁸⁸, en tanto que las relaciones de Heisenberg son sólo la consecuencia. Que el espacio y el tiempo estén indeterminados por el principio de Heisenberg, sólo nos dice que el marco espacio-temporal no es independiente de los fenómenos que en él suceden; es decir, que están comprometidos y ligados, físicamente, a su correspondiente par mecánico, canónicamente conjugado.

Ahora bien, afirmar que el espacio, tal y como nuestro entendimiento es capaz de concebirlo y de imaginarlo, no sirve de principio diferenciador y separador de los fenómenos cuánticos es afirmar que no tiene realidad física, que no es condición de posibilidad de los objetos. Esta

⁸⁸ Tras el análisis que realicé más atrás acerca de las objeciones y crítica de Einstein, se pudo concluir que para él una teoría tiene contenido intuitivo cuando contiene elementos objetivos, pertenecientes a la categoría de “lo real”; estos elementos de la realidad son, fundamentalmente, el espacio y el tiempo unidos en el marco espacio-temporal. Y el instrumento que Einstein empleó para descubrir tales elementos, y justificar su postura realista, lo constituye el principio de separabilidad espacial de los sistemas físicos.

negación del realismo espacial es lo que pone en un compromiso al contenido intuitivo de la física cuántica y no la realidad intrínseca del tiempo.

Superar esta dificultad fue el objetivo de la respuesta de Bohr al artículo EPR: el postulado de localidad no tiene un valor físico, defiende Bohr; su sentido es, únicamente, epistemológico. Esto quiere decir que el espacio de la física clásica, aquél que se corresponde con el de nuestra percepción, con sus características euclídeas, no es el espacio real; sólo es el espacio que nuestra mente es capaz de percibir, concebir y entender. La física clásica pudo suponer que este espacio era realmente una condición de posibilidad de los objetos materiales; pero, la física cuántica lo ha descubierto como un espacio impostor. Por ello, para Bohr el principio de separabilidad espacial⁸⁹ no tiene realidad física y su violación, por parte de la física cuántica, sólo supone un problema epistemológico, el cual se resuelve, según él, apostando por un nuevo modelo de inteligibilidad, las representaciones simbólicas y analógicas, y por un nuevo marco conceptual, la complementariedad.

Bohr sólo negó la realidad de este tipo de espacio, el que maneja nuestro entendimiento, pero no rechazó la posibilidad de otro espacio real, como condición de posibilidad de los objetos materiales; sólo que este espacio ni se identifica, en cuanto a sus características o propiedades, con el de nuestro entendimiento ni puede convertirse él mismo en el nuevo espacio gnoseológico porque no podemos cambiar el viejo, *no podemos pensar* ese nuevo espacio.

Nuestro pensamiento y el lenguaje dependen de ese tipo de espacio clásico, por ello no es posible construir nuevos conceptos que reemplacen a los de siempre: el tipo de espacio gnoseológico, encumbrado por la física clásica, es indispensable para nuestro entendimiento, descripción y comunicación de él; sin embargo, no es el espacio real y, por lo tanto, se ha de asumir un nuevo modelo de inteligibilidad que tenga en cuenta esta divergencia entre el espacio gnoseológico y el físico. Este último nos resulta totalmente inaccesible y la teoría no puede aprehender esta realidad espacial, no puede estructurarla, captar, o “mapear”, su estructura porque ésta no se corresponde con la del tipo de estructuración espacial que realiza nuestro entendimiento.

⁸⁹ Este principio no es más que la concepción de espacio continuo, plano y homogéneo, que el sentido común y nuestra propia percepción tiene de él, elevado a la categoría de un principio de la naturaleza o ley física.

El espacio como condición de posibilidad de nuestra sensibilidad (y capacidad de representar y describir), al no ser el mismo que el de los objetos, es un espacio ideal, cuya aplicación al espacio real de los objetos físicos sólo puede hacerse de una manera simbólica, a través de una analogía, un parecido asintótico con él, pero que nunca deja de aproximarse, sin llegar a la identificación entre uno y otro. Por ello, las propiedades espacio-temporales de los sistemas físicos, las que son propiamente espaciales y aquellas temporales que dependen de la espacialidad, sólo pueden ser fenoménicas: el fruto de la conjunción del objeto cuántico con el instrumento clásico, la realidad en sí misma que sólo puede ser aprehendida por medios macroscópicos, un mundo real *reconfigurado* para que podamos acceder a él, conocerlo y *reconocerlo*; pero reconfigurado no sólo por la mediatización de los dispositivos físicos y mecánicos de una medición, sino por la concepción espacial de la inteligencia humana con que aquéllos fueron pensados, diseñados y construidos, para que podamos acceder al mundo y conocerlo⁹⁰.

Esto nos lleva de vuelta a la segunda pregunta: ¿es la intuición temporal condición de posibilidad del conocimiento? Es decir, ¿es capaz de ofrecernos representaciones espacialmente simbólicas, que sirvan para describir la realidad del mundo cuántico?

El paso previo para responder a esta cuestión es acordar que la intuición temporal es la base de la representación aritmética y la espacial de la geometría y esto fue lo que perseguí a lo largo del apartado 7.1; ahora bien, ¿puede la aritmética constituirse en una representación del mundo físico? La mayoría de los matemáticos y de los filósofos de la matemática así lo entienden y lo justifican con sus tesis, y en este punto también me remito a dicho apartado.

No obstante, esto no es suficiente y nos urge ir más allá, es decir, ¿la representación aritmética, basada en la intuición temporal, nos ofrece algo más que *modelos formales* de la realidad física? Más atrás ya explicité el uso de las expresiones “modelo formal” y “modelo material”, este último comprende al primero, en tanto que no sólo facilita una descripción matemática, o representación aritmética, vacía de connotaciones físico-materiales, sino que contiene la posibilidad ontológica de ser un modelo, formado por nuestro intelecto, que, a su vez, representa a la materia física en toda su exterioridad. Para lo cual, tal modelo ha de considerar la faceta espacial desde la que se caracteriza el materialismo físico; ahora bien, si

⁹⁰ Razón por la cual, Einstein apartó a Bohr de los físicos realistas; para aquél el realismo debía ser espacial.

este tipo de espacio no resulta directamente accesible o representable a nuestro intelecto, ¿puede considerarse la posibilidad de representación espacial de tipo simbólico, a la cual accedemos por mediación de la representación temporal?; es decir, ¿a través de la intuición temporal podemos aprehender la estructura o forma de la materia externa, como su condición de posibilidad objetiva o determinante del objeto cuántico? Éste es el interrogante final al que conduce la anterior cadena de preguntas y respuestas y cuya solución propongo aquí.

Si partimos de esta tesis, se podría afirmar lo siguiente. Una vez roto el isomorfismo entre el espacio empírico o gnoseológico (el que es condición de posibilidad de nuestra percepción y entendimiento) y el espacio físico, ontológico, “real” u “objetivo”(aquél que es condición de posibilidad de los objetos extralingüísticos), el cual fue tradicionalmente asumido por los ideales descriptivos del marco clásico y en la interpretación escolástica de la filosofía kantiana basada en los “Principios Metafísicos de la Ciencia de la Naturaleza”, la capacidad humana de entender la realidad nos ofrece otra oportunidad: la posibilidad de ajustar el espacio físico al espacio gnoseológico a través de una especie de traducción, o de correspondencia, en términos kantianos podría decirse que dicha correspondencia viene realizada por el *esquema*, como tercer elemento, mediador entre aquellos dos, que tiene la capacidad de volverlos homogéneos de dos maneras: directa o bien indirecta.

Es decir, si la homogeneización es directa es porque ambos han coincidido plenamente; si es indirecta, se estaría hablando de una “correspondencia simbólica”, donde prevalece la realidad del espacio físico (como condición de posibilidad del objeto) sobre el gnoseológico (en tanto condición de posibilidad del entendimiento): *lo irrepresentable se representa simbólicamente*.

La interpretación habitual de la filosofía de Kant se queda en aquella capacidad de identificar el espacio físico o “real” con el gnoseológico o “ideal” a través de una homogeneización directa, realizada por el esquema. Pero, en realidad, este esquema sólo serviría de elemento decorativo si no fuera capaz de realizar una *correspondencia simbólica indirecta*, la cual sólo es posible que se realice o que se determine a partir de la intuición temporal con la que construimos el “número”. Esta reflexión, a la que me ha conducido el estudio de las ideas de Kant acerca del esquema y del uso material del tiempo, la juzgo ineludible, pues si la correspondencia fuera siempre directa, no se necesitaría ningún tercer elemento, ya que ambos se identifican y se funden el uno en el otro; si la correspondencia puede ser, además, indirecta es porque cada uno conserva

sus propias características distintivas que los vuelve independientes y, por lo tanto, posibilita diferentes accesos del uno al otro, que dependen, no ya sólo del espacio euclídeo, sino también de otros tipos de espacio, que no coinciden con el empírico, pero que pueden tener su traducción en él.

De tal forma que, primero, cuando se dice que el espacio como intuición pura ha fallado, en realidad lo que falla es aquella supuesta coincidencia del espacio “ideal” (empírico, gnoseológico o “sensible”) con el espacio física y ontológicamente “real” (objetivo o “inteligible”); segundo, cuando Bohr habla del fracaso espacio-temporal siempre se refiere al espacio y al tiempo empíricos, sobre todo al espacio de nuestra percepción: el que nos permite “dibujar” figuras y espacializar la materia en forma de modelos geométricos euclídeos o pictóricos. Y, ciertamente, si ambos tipos de espacio son homogéneos y el empírico ha fallado como elemento descriptivo de la realidad, nos encontramos con que se rompe el puente tradicional entre realidad y teoría, o entre lo sensible y lo inteligible, y la teoría pierde toda conexión con la realidad, con lo cual no hay descripción física de la realidad realizada por la física cuántica, tal y como concluyó Einstein.

No obstante, en este razonamiento se ha excluido al tiempo: si el tiempo conserva el doble valor de elemento objetivo y de nuestro conocimiento, que se determina en esquema a través del número, tenemos *un tipo de conexión con la realidad* y si, además, esta forma de la intuición interna es capaz de ofrecer otro tipo de relación entre el espacio sensible, ideal y empírico (subjetivo) y el espacio inteligible, real y físico (objetivo), que no es la de una coincidencia entre ambos o correspondencia directa, tenemos otra forma distinta de espacializar la materia, *un modelo o “imagen” simbólica*, no figurativa, de la realidad, tal y como nos la presenta la física cuántica, que, aun sin obedecer a los ideales clásicos descriptivos, puede considerarse como un tipo de descripción física, con una conexión simbólica con la realidad que justifica su valor realista frente al instrumentalismo físico.

El “parecido asintótico” de la descripción, que ofrece la mecánica cuántica de la realidad física, con la realidad misma se debe a que estamos obligados a ofrecer una representación figurativa de algo que es irrepresentable de esta manera. Por lo tanto, las imágenes espaciales de las que disponemos son únicamente representaciones simbólicas pero que, gracias al “principio de correspondencia”, conservan un cierto contenido físico, un valor realista porque el “puente” con la realidad puede establecerse siguiendo otra vía, que no es la correspondencia directa con el espacio euclídeo, el que coincide con el de nuestra percepción.

Esta otra vía, que Bohr llama “analógica” y que aquí propongo que esté fundamentada en el tiempo como intuición, en tanto elemento objetivo y subjetivo, nos conduce hasta otro modelo de inteligibilidad en la Ciencia, porque no se ha de olvidar que no sólo lo perceptible es inteligible, o incluso sensible. Podemos (y debemos) entender cosas que no se pueden representar espacialmente en tres dimensiones, podemos entender sin figurar y, por lo tanto, la garantía realista basada en la espacialización no sirve en este modelo de inteligibilidad y ha de ser superada por otro tipo de garantía más “eficaz” y fructífera que la espacial: esto sólo puede hacerlo la intuición temporal.

d) Más allá de la complementariedad: una tesis realista del mundo cuántico

Mi interés, aquí, se centra en subrayar no sólo la existencia del rasgo realista presente en la complementariedad sino también, y sobre todo, en resaltar la importancia que éste tiene en el pensamiento de Bohr. Para ello, me baso en tres elementos de su nuevo marco conceptual, que son, como se recordará: su tesis semántica, el compromiso ontológico que ésta implica y el nuevo modelo de inteligibilidad que él propone para validar su propuesta acerca del contenido intuitivo de la física cuántica.

Antes de continuar no debe olvidarse que la defensa realista que Bohr mantiene, a partir de estos rasgos que caracterizan sus ideas, es de tal corte que se opone siempre al instrumentalismo y no al fenomenismo. Pues, a pesar de que fenomenismo y realismo puedan ser términos opuestos, en el marco de la complementariedad son conjugables siempre y cuando se acepte la acepción de Bohr del vocablo “fenómeno”, el cual excede o sobrepasa el uso tradicionalmente fenomenista, del tipo de Berkeley por ejemplo, porque obliga al objeto a entrar en el juego semántico como el referente extralingüístico de la percepción del fenómeno a través de los dispositivos de medida, esto es, como el factor objetivo al que se refiere una observación.

De ahí que pueda considerar a las propiedades físicas espaciotemporales como propiedades fenoménicas a la vez que objetivas, lo cual horroriza a Einstein, quien sólo puede concebir una propiedad física en término de objetiva si es “real”, entendiendo por esto “realidad física independiente”, esto es, no-fenoménica, ya que Einstein sí opone conceptualmente ambos términos; por ello, jamás aceptó ese aire de

“fenomenismo objetivo” que Bohr quiso defender en sus propuestas de revisión epistemológica.

El realismo que Einstein y el marco de la física clásica defienden es un realismo sustancialista, al estilo de la primera analogía de Kant: Sustancia como Permanencia, algo que permanece inalterable a pesar de los cambios; y al estilo también de la lógica formal: Sujeto y Predicados, propiedades físicas como atributos reales (nunca fenoménicos) de los objetos.

El realismo de Bohr no es sustancialista en ninguno de estos dos sentidos. Al contrario, desde él se defiende, frente a la sustancialización de la materia, por un lado, un planteamiento *relacional* donde se concibe a dicha materia de manera dinámica y como una “red de relaciones”, por ejemplo, el concepto de “campo” se entiende como una serie de relaciones numéricas; por otro lado, es *fenoménico* y *dinámico*: el objeto no permanece con los cambios; el objeto *es* el propio cambio cuando se modifican las condiciones de observación, esto es el fenómeno⁹¹; y, por último, es *simbólico* y *relativo*, relativo a nuestra capacidad de entendimiento y de descripción, la cual se ha revelado simbólica, según Bohr, esto es, no se trata de una descripción basada en la capacidad de representación pictórica de las teorías sino en la representación por analogía con respecto a las propiedades geométricas.

Por esta razón, Einstein tachó a Bohr de fenomenista, ya que éste defendió que el espacio gnoseológico, el de nuestro intelecto y, por ende, el de la física clásica, era un espacio ideal y que el único acceso a la realidad (al espacio real) era a través de aquel espacio ideal, considerado como símbolo, por lo tanto, tal concepción simbólica del espacio intuitivo sólo puede asignar un carácter fenoménico a las propiedades espacio-temporales de los sistemas mecánicos, convirtiendo a la descripción física, que éstas ofrecen del mundo, en una descripción simbólica.

Pero, he de insistir en que Bohr pretende recuperar el realismo de las teorías físicas desde otra vía: afirmando que, a pesar del carácter simbólico y analógico de los conceptos espacio-temporales, éstos preservan un tipo de conexión real, una forma de contenido intuitivo que pone a las

⁹¹ La física cuántica exige, entre sus cambios conceptuales, que se sustituya la concepción “estática” no sólo del movimiento sino también de la sustancia material, que reinaba en el marco de la física clásica, por una concepción “dinámica” de la materia y del mundo físico en general, incluido el movimiento que realizan los sistemas mecánicos. No entraré en este tema pero apuntaré que de Broglie defiende que dicha concepción podría aproximarse a las ideas filosóficas que defendió Bergson acerca de la auténtica naturaleza del movimiento, la duración y el tiempo.

teorías en correspondencia con la realidad en sí. Aunque esta correspondencia, al ser asintótica y no isomórfica (debido a la heterogeneidad entre los dos elementos de la relación), no permite recuperar el ideal clásico de descripción realista.

Un ejemplo de representación temporal es nuestra percepción de los sonidos: éstos tienen un carácter esencialmente temporal ya que sólo necesitan del espacio en tanto medio material por el que propagarse; ahora bien, pueden ser simbolizados espacialmente a través de unos signos escritos sobre el papel de un pentagrama, pero estos símbolos espaciales son arbitrarios, convencionales y no implican ninguna relación ni semejanza espacial con la realidad misma de los sonidos que representan. En este sentido es en el que el segundo Wittgenstein afirma que los términos lingüísticos son símbolos de la realidad, convenciones lingüísticas que adquieren sentido cuando los usamos.

No obstante, cuando Bohr habla de representación simbólica, por parte de la descripción mecánico-cuántica de la realidad, en tanto que representación espacial supone que tales símbolos espaciales, contenidos en los conceptos descriptivos de la física, sí guardan una relación de semejanza con la espacialidad de los objetos mismos; sólo que Bohr, al no adentrarse en la ontología, no llegó nunca a explicitar cuál era esta semejanza. Además, para él estos símbolos no son arbitrarios porque si lo fueran podrían ser sustituidos por otros para construir nuevos conceptos: la representación simbólica de los conceptos espacio-temporales nos viene impuesta por las *condiciones de posibilidad del conocimiento humano* que se han de adaptar, de una manera u otra, a las *condiciones de posibilidad de los objetos microfísicos*. Por lo tanto, esta capacidad de adaptación no es fruto de ninguna convención sino de una *correspondencia real* entre el símbolo y el objeto, la cual está presente de forma indisoluble en el fenómeno. Por decirlo de otro modo, los fenómenos cuánticos son símbolos de los estados reales de los objetos atómicos y toda representación espacial, o pictórica, que podamos tener de ellos es un símbolo espacial que nuestro entendimiento proyecta sobre el espacio real, el espacio en sí mismo, independiente del sujeto cognoscente, que nos resulta directamente inaccesible como tal, pero que podemos aprehender por la vía indirecta del significado analógico que conlleva tal representación simbólica.

El motivo por el cual Bohr vio y enfocó así el problema del realismo, frente a Einstein, fue que en su pensamiento desligó la cuestión del representacionismo pictórico y del contenido intuitivo, que tal representación puede llevar, del realismo (a diferencia de Einstein), y la vinculó a un problema de inteligibilidad, que pedía revisiones

epistemológicas: ¿cómo entendemos la realidad? ¿cómo podemos entender la física cuántica?

La complementariedad fue la respuesta que ofreció el danés, una vez que aceptó y asumió la capacidad descriptiva de esta nueva teoría sobre la realidad física. El problema es que sólo postuló esta solución al realismo; jamás dio una justificación de tal propuesta y por ello Einstein no “sintió” la necesidad de adherirse al “dogma de Bohr”.

Por esta razón, mi objetivo es ofrecer una justificación filosófica, una fundamentación intuitiva, del único tipo de conocimiento físico que la teoría cuántica puede defender, para justificarse a sí misma: la complementariedad tiene su apoyo gnoseológico en la intuición temporal; es decir, partiendo de ésta, puede garantizarse, siguiendo los argumentos que desarrollo a continuación, el nuevo tipo de conocimiento, de representación y de descripción física, que propone Bohr.

Tras el análisis de Bergson, se ha de admitir con Kant que la intuición espacial, en tanto que sentido externo, es aquella condición de posibilidad de nuestro entendimiento que garantiza la posibilidad del conocimiento físico, ya que éste se caracteriza por hacer afirmaciones acerca del mundo objetivo-material, por ser un conocimiento acerca de la exterioridad. Sin embargo, el espacio gnoseológico, o empírico, es el espacio de nuestra percepción, que se corresponde con el espacio euclídeo: plano (con sólo tres dimensiones), homogéneo y continuo; de modo que este espacio empírico, como condición de posibilidad de nuestro entendimiento, en física cuántica no se corresponde con el espacio como condición de posibilidad del objeto, esto es, el espacio físico, inteligible o “real”⁹².

Es decir, en la actualidad de la ciencia física, la intuición espacial, en tanto que conforma nuestros conceptos descriptivos, tiene valor gnoseológico pero carece de valor objetivo; por tanto, el espacio euclídeo, el de la física clásica, sólo tiene un valor subjetivo, que no tiene correspondencia real con el mundo físico. El espacio físico, como condición de posibilidad del objeto material, que nos ha mostrado la mecánica cuántica y la relatividad junto con las geometrías no-euclídeas, es discontinuo, heterogéneo y “curvo” (con cuatro dimensiones). Éstas han de

⁹² Debido a esta coincidencia entre el espacio de la geometría euclídea y el espacio de nuestra percepción, en física clásica se confundía el término “espacio empírico” con “espacio físico”. La aplicación de la geometría riemanniana a la teoría de la relatividad puso de manifiesto que no todo espacio físico, en este caso el de Riemann, era además espacio empírico, pues aquél no puede ser percibido por nuestra sensibilidad.

ser las condiciones espaciales de posibilidad de los objetos cuánticos; pero tales condiciones no se corresponden con las de nuestro entendimiento y no podemos hacernos una representación mental de él⁹³.

Por tanto, o bien, nos rendimos a que la física cuántica verse sobre un mundo que nos resulta incomprendible, o bien, cambiamos nuestro modelo de inteligibilidad y nos conformamos con una “representación” analógica del espacio: a través del espacio gnoseológico, nos formamos una imagen espacial euclídea del espacio real o físico (no-euclídeo), el cual sí tiene un valor objetivo como elemento de la realidad física; pero se trata de una imagen que no es “pictórica” u “ostensiva” porque el espacio no se nos “manifiesta” a nuestra percepción y entendimiento como realmente es. Dicho de otro modo, las condiciones de posibilidad del conocimiento y del objeto no coinciden.

Por consiguiente, los modelos y los conceptos descriptivos, como son los de onda y partícula, construidos a partir del espacio gnoseológico, son descripciones espacio-temporales asintóticas que sólo se parecen y se aproximan a lo que realmente ocurre en el mundo físico, pero no son modelos isomórficos o pictóricos de la realidad porque el espacio físico no coincide en sus condiciones de posibilidad con el espacio gnoseológico; de ahí que su aplicación al mundo esté restringida. Éste es el problema con el que se tiene que enfrentar Bohr para justificar el uso simbólico del lenguaje clásico: el único posible para la Física porque es el lenguaje de la comunicación y del entendimiento humano, no sólo al nivel ordinario del lenguaje vulgar, sino también para el lenguaje refinado y cuantitativo de las ciencias físicas.

Ahora bien, el lenguaje natural, como una extensión de nuestro pensamiento, es un reflejo de las condiciones de posibilidad del conocimiento; pero, si éstas no coinciden, plenamente, con las condiciones de posibilidad de los objetos físicos, ¿cuáles son éstas y cómo garantizar que, aun sin coincidir, esto es, sin ser homogéneas, puedan ambas ponerse en correspondencia y crear un nexo entre ellas?

Tales consideraciones conllevan la necesidad de especificar, tal y como haré en el próximo apartado 7.3, las condiciones de posibilidad de los “objetos microfísicos” y de adentrarse en el contexto ontológico de la física cuántica. Hasta aquí me he centrado en los razonamientos que avalan el

⁹³ La única representación mental posible de este tipo de espacio no es directa; sólo a través de una analogía, como dice Bohr, o, como admite Einstein, de una vía indirecta o correspondencia entre las geometrías no euclídeas y la euclídea, podemos formarnos una “imagen visual” o una descripción espacial (euclídea) de este espacio.

carácter de su condición como elemento gnoseológico o subjetivo en el conocimiento que del mundo ofrece la física cuántica y su no contradicción con las ideas que sostuvo Bohr en torno a su interpretación epistemológica de ésta.

A partir de ahora, expondré las implicaciones ontológicas que contiene tal tesis, así como el valor de la intuición temporal en tanto condición de posibilidad objetiva del mundo cuántico, que se correlaciona con las condiciones anteriores, y en tanto garantía de un tipo de realismo “simbólico”, que puede ser defendido a partir de la revolución cuántica.

7.3) Corolario Ontológico: Las Condiciones Físicas de Posibilidad de los Objetos Cuánticos

Gracias a los razonamientos anteriores he podido concluir que existen dos tipos de fundamentación intuitiva: la espacial y la temporal, y con ellos dos tipos de representaciones o modelos de la realidad, los cuales, además, proporcionarán (o más bien, determinarán) dos marcos ontológicos distintos. Los argumentos a favor de la validez de esta fundamentación temporal fueron expuestos en los anteriores epígrafes; en éste, en cambio, partiré de aquéllos para extraer sus implicaciones ontológicas.

Dado que toda ontología se construye a partir del tipo de intuición con la que construimos el sentido físico de los marcos conceptuales, ahora, ya sí se puede hablar de la ontología a la que da lugar la complementariedad, porque ya he dejado establecido que el fundamento intuitivo de la física cuántica es básicamente temporal. Por tanto, esa ontología se ha de fundamentar en la intuición del tiempo, la cual puede permitir un tipo de realismo cuántico, que denominaré “simbólico”. No obstante, comenzaré por ciertas consideraciones sobre la supuesta disyuntiva entre mundo cuántico y mundo clásico que son el prelude a toda discusión ontológica, ya que se ha de aclarar cuál de ellos tiene validez ontológica.

a) El mundo cuántico y el mundo clásico

Ante la pregunta de si ambos mundos son inconmensurables para Bohr, he de matizar que lo son *sólo epistemológicamente*; no ontológicamente.

Cuando Bohr habla de la naturaleza y de los principios físicos de ésta sólo se refiere a las propiedades cuánticas: el cuanto de acción es un postulado esencial de la naturaleza; o bien, cuando afirma que el indeterminismo tiene un valor objetivo, es físico y no gnoseológico, etc. De ahí que, a mi juicio, el danés considere al mundo cuántico como el mundo real, aquél que tiene prioridad ontológica sobre el clásico; no obstante, él nunca explicitó esta idea porque no distinguió entre prioridad epistemológica y ontológica, lo cual introduce una gran oscuridad en su discurso y la idea errónea de que el mundo clásico tendría prioridad ontológica sobre el cuántico, en el marco de la complementariedad.

Sin embargo, dicha prioridad clásica es epistemológica en el sentido de que Bohr sólo se refiere a la terminología de nuestro lenguaje cuando pone bajo su consideración a las propiedades clásicas: el lenguaje clásico; nuestras formas habituales de pensamiento; los dispositivos experimentales construidos y definidos en términos clásicos, etc. Incluso, Bohr está de acuerdo con de Broglie en que los dispositivos son clásicos porque en la escala superior a la que regula el cuanto de acción, en la que éstos se inscriben, su valor es tan pequeño que a efectos *prácticos* es despreciable; pero *no desaparece*.

Ahora bien, si ambas físicas son incompatibles y ambas son indispensables⁹⁴, ¿tenemos, entonces, dos mundos incommensurables que segmentan en dos al realismo: el mundo clásico con su realismo clásico y el mundo cuántico con su realismo cuántico?

La respuesta es que no. Los dos “mundos”, esto es, las dos realidades, incommensurables, de la física clásica y la física cuántica, sólo se dice en sentido figurado, con un significado epistemológico y no ontológico, ya que aquello que es incommensurable es el marco conceptual de una y otra, los cuales sólo pueden ponerse en relación a través del principio de correspondencia. El mundo físico, la realidad material, es uno y es el mismo en ambos niveles de experimentación y este mundo, para Bohr y la complementariedad, es esencialmente cuántico porque el postulado cuántico es un hecho esencial de la naturaleza, de la realidad, y el llamado “mundo clásico”, a partir del cual construimos el lenguaje de la física, basado en nuestra sensibilidad y experiencias inmediatas, es, únicamente, una idealización de las condiciones cuánticas, que aun estando presentes en el nivel mesofísico, sus efectos son despreciables y por ello podemos aparentar que no existen. Pero, la concepción clásica del mundo

⁹⁴ Para Bohr la física cuántica es indispensable por razones estrictamente científicas y la clásica por motivos gnoseológicos o epistemológicos.

es sólo una aproximación más o menos válida según nos alejemos o nos acerquemos al nivel atómico.

De modo que no hay una diferencia ontológica, sólo epistemológica, entre lo clásico y lo cuántico. Si la inconmensurabilidad es estrictamente epistémica y no óptica, no hay, entonces, realismo disyuntivo y cuando se habla de “realismo cuántico” es sólo por oposición a la *concepción* clásica de realidad y de objetividad: la complementariedad pretende defender que la física cuántica mantiene un compromiso ontológico con la realidad, de tal forma que la concepción de realismo que de ella se desprende es la “auténtica” y, por tanto, subyace y es lógica y ontológicamente anterior al llamado “realismo clásico”, el cual supondría aceptar el realismo de las propiedades espacio-temporales, ya que sobre ellas se sostiene, y sin embargo para Bohr son fenoménicas y no existen con independencia de la observación. Tal concepción clásica de la realidad sí está anticuada porque ha sido desmentida por los nuevos avances científicos: el realismo clásico, por ser una *idealización* de las condiciones cuánticas, que son las “reales”, es, para Bohr, una ilusión, la cual si no puede ser erradicada del todo, sí, puede, al menos, ser descubierta, desvelada, “sacada a la luz”, para no enredarnos entre sus mallas.

Esto es lo que algunos autores llaman la “nueva revolución copernicana”: la forma como percibimos el mundo, nuestro patrón de conocimiento, el cual sigue los cánones clásicos, no le puede decir al mundo cómo ha de ser, aquél no coincide con el patrón que sigue la realidad. El “mundo clásico”, el que es directamente accesible a nuestros sentidos no es el *mundo real* y no puede servir de modelo al realismo, a lo que la realidad es, pues ésta se ajusta a los cánones cuánticos. Este realismo ha de luchar contra muchas cosas, hábitos, prejuicios, ambigüedades, imprecisiones; pero, sobre todo, contra un lenguaje, en el que él mismo está condenado a expresarse, que está construido siguiendo los cánones clásicos, como caso ejemplar de nuestra capacidad de pensar: del modo ineludible de percibir la experiencia, de conocer la realidad y de expresar pensamientos sobre aquélla.

Éste es el auténtico drama, la tragedia de la física atómica, el cual no se resuelve negando las condiciones gnoseológicas del pensar humano, que fueron plasmadas, de manera paradigmática, en el marco conceptual de la física clásica. No importa el contenido teórico de esta física, no importan sus leyes; aquello sobre lo que no podemos pasar por alto es su carga intuitiva, pero no tanto en cuanto que se refiera a la realidad, pues ésta es negada por Bohr en favor de una concepción “cuántica” de aquélla, sino, más bien, en tanto su relación con las condiciones gnoseológicas del

pensamiento humano, las cuales son ineludibles. No podemos pensar de otra manera; pero, sí podemos modificar la concepción que nos hemos formado acerca de nuestro propio pensamiento, cambiando el modelo de inteligibilidad: percibimos la experiencia y pensamos en términos espacio-temporales, pero estos modelos, que nos hemos formado en nuestra mente, no se ajustan a lo que la realidad es y sólo podemos usarlos de una manera analógica como representaciones espacio-temporales simbólicas. Ésta es la propuesta de Bohr, la lección epistemológica de la complementariedad, el principio lógico que guía su pensamiento; es el único camino que vio Bohr para defender el realismo de la física cuántica: un realismo muy matizado, un realismo con muchas concesiones al fenomenismo, pero comprometido ontológicamente, en la medida en que defiende la realidad de las condiciones cuánticas por encima de todo lo clásico, lo cual queda reducido, en el planteamiento de Bohr, al ámbito gnoseológico de la sensibilidad y del lenguaje humano.

Con respecto a esta misma cuestión también surge otra pregunta: *¿si la física clásica tiene contenido intuitivo porque sus conceptos mantienen una conexión con la realidad, entonces lo real será el mundo clásico y no el cuántico?*

La respuesta, de nuevo, es negativa: el contenido intuitivo viene no por esa conexión con la realidad, ya que ésta no existe si la realidad es cuántica, sino por una conexión con la capacidad humana de percibir y de experimentar la exterioridad, lo que nos rodea.

Ahora bien, una pregunta más: *¿qué significa, entonces, que la física cuántica recupere el contenido intuitivo por analogía con la física clásica?*

No podemos hablar de la realidad porque sólo podemos expresar correctamente lo que podemos percibir y aquélla, como es cuántica, no la podemos percibir directamente; pero sí podemos hablar de ella a través de medios indirectos (analógicos). De ahí que tropecemos con esta posible respuesta: la intuición espacial, responsable de las representaciones pictóricas, no es un elemento de la realidad; sólo condición gnoseológica y ésta es la que se ve modificada de un marco conceptual a otro: el espacio, al menos el de nuestra percepción, no pertenece al mundo cuántico, al mundo, a la realidad y sólo podemos hacer uso de la intuición espacial en tanto símbolos espaciales y no representaciones reales.

Pero, entonces, *¿cuál es el elemento de realidad que conserva el contenido intuitivo de la física cuántica?* La intuición temporal es el elemento clave que avala el compromiso ontológico del marco de la

complementariedad, pues ha de ser la condición gnoseológica que coincida con la condición ontológica para justificar el realismo de esta física.

Es una petición de principio, admito, pero muy poderosa porque con ella se explica, por un lado, el hecho de disponer de un aparato matemático, altamente sofisticado, que se adapta a los fenómenos y se aplica en toda experimentación y, por otro lado, el uso analógico de las representaciones simbólicas que construimos a partir de la intuición espacial. El fracaso de la descripción espacio-temporal, de la que siempre nos habla Bohr, es el fracaso de las representaciones pictóricas, de los modelos imaginativos y especulares de la realidad; este fracaso se debe a que el espacio ha perdido su carácter objetivo y con ello su capacidad de procurarnos representaciones ostensivas en él, pues la realidad ya no se manifiesta espacialmente. No obstante, nada se dice del valor objetivo, o sentido físico, de la intuición temporal; por lo cual, el tiempo es una condición de posibilidad del conocimiento y del objeto, es un elemento cognoscitivo a la vez que elemento objetivo de la realidad y, además, es gracias al uso que hacemos de él cómo podemos reconstruir imágenes espaciales del mundo físico pero con carácter simbólico, ya que estas condiciones espaciales no pertenecen a la realidad, sólo a nuestro conocimiento de ella.

Por lo tanto, cuando afirmo que la física cuántica entra en conflicto con la física clásica y la destrona, no estoy hablando simplemente del conflicto entre dos teorías: muchas ocasiones ha habido en la historia de la ciencia en las que una teoría ha sustituido y superado a otra; éste no es el problema. El problema es que la física clásica es una ejemplificación, sencilla, rigurosa y transparente, de nuestra forma de percibir y experimentar, de entender la realidad y de aprehender el mundo y el lenguaje de la física clásica, sus conceptos, es el lenguaje, como extensión del pensamiento, con el que podemos comunicarnos.

De tal modo que, cuando la física cuántica desafía a la física clásica, lo relevante es que el desafío va dirigido contra nuestra capacidad de percibir, conocer y de explicar. Los esquemas en los que se basa tal capacidad son invariables: tan inútil es que nos esforcemos en crear conceptos nuevos, propiamente cuánticos, como vano es también dar una interpretación, es decir, una explicación de esta física en lenguaje cualitativo, ordinario, que sea “propiamente cuántica” en términos de un lenguaje que no está adaptado a lo “cuántico” sino a lo clásico. Y esto es así, porque ambos, tanto el lenguaje natural como la física clásica comenzaron con la experiencia, la experiencia ordinaria, la de nuestros sentidos; por esta razón, el ensamblaje entre ellas es perfecto: el primer

paso hacia el conocimiento lo realizamos desde la experiencia ordinaria. Percibimos espacio-temporalmente y construimos un lenguaje donde todos sus conceptos implican características espacio-temporales; la física cuántica no encaja con esta manera de percibir ni se adapta, como lo hacía la clásica, al lenguaje cualitativo y he aquí la catástrofe.

Hoy en día el lenguaje cualitativo, con el que trabaja la física clásica, sigue siendo tan indispensable como en la época de Newton y como siempre lo ha sido y será, tal y como mantuvo Bohr: necesitamos este lenguaje que se originó en la experiencia del mundo que nos rodea, en la percepción de nuestro entorno; sin él no podríamos ni entendernos ni comprender ni comunicar nada. No podemos construir un edificio, derribar después las vigas que lo sujetan al suelo y pretender que siga en pie⁹⁵.

Con los años nos hemos acostumbrado tanto a la física cuántica que hemos asumido que existe un “lenguaje cuántico” y que éste tiene sentido. Nos hemos habituado a decir, no ya que el electrón es onda y corpúsculo, sino que su comportamiento obedece a propiedades corpusculares y ondulatorias; así creemos que con evitar la oración nominativa, copulativa, hemos afirmado algo que no es tan contradictorio como lo anterior. Sin embargo, esta actitud presupone que no existe contradicción lógica entre tales propiedades.

No olvidemos que la contradicción no sólo es lógica, sino también física o conceptual, en el siguiente sentido: el electrón se comporta a veces de tal modo que asume propiedades ondulatorias y otras corpusculares; esto es, ciertas magnitudes mecánicas se obtienen a partir de propiedades ondulatorias y otras de aquellas magnitudes mecánicas se obtienen a partir de propiedades corpusculares. Las primeras son ondulatorias porque sólo tienen sentido dentro de una teoría ondulatoria, donde se han originado y se definen plenamente; las segundas son corpusculares por lo mismo, pero dentro de una teoría corpuscular.

Cada una de estas teorías son incompatibles entre sí porque tienen principios físicos, postulados, teoremas y conceptos que son contradictorios entre sí y, sin embargo, los hechos y la teoría los ha unido. Este suceso aún no tiene explicación: no entendemos por qué podemos unir en física cuántica aspectos de dos teorías incompatibles.

Mientras que no encontremos la razón capaz de resolver tal incompatibilidad conceptual, desde la que pudiéramos comprender que no son, realmente, incompatibles por el motivo que sea, no dispondremos de un lenguaje propiamente cuántico con sentido o con referencia lingüística,

⁹⁵ ¡Pero, si ya no tiene “pie”!

porque *¿qué clase de representación nos ofrece este lenguaje que, dada la incompatibilidad de sus conceptos, está lleno de ambigüedades?* La costumbre de usarlo nos ha hecho olvidar esto y creer que tiene referencia empírica (directa), pero tal creencia es sólo un supuesto oculto, un supuesto implícito, que al no ser explicitado sólo nos aporta oscuridad en lugar de la pretendida claridad, de la que se habla actualmente, con la que los años y la madurez nos habrían hecho ver la auténtica naturaleza de la física cuántica.

Por consiguiente, seguimos necesitando el lenguaje clásico y adaptarlo a las condiciones cuánticas. Como esta adaptación no es inmediata, hemos de seguir usándolo de una manera restringida: estas limitaciones nos vienen impuestas a nivel empírico y teórico, por el principio de indeterminación. Tales restricciones nos han sido reveladas, a nivel epistemológico, por la lección que extrae Bohr de todo ello: la condición para seguir empleando el lenguaje clásico es usarlo en sentido analógico y simbólico; esta restricción epistemológica está en consonancia con las limitaciones empíricas y teóricas.

Dicho brevemente, no tenemos un lenguaje propiamente cuántico y si no lo tenemos, sólo disponemos del clásico; ahora bien, su uso no puede ser el mismo que en el marco clásico porque entonces sería tan ambiguo como el supuesto lenguaje cuántico: en realidad, sería el mismo, esto es, un lenguaje clásico con el mismo uso que en el marco clásico, sólo que evitando las proposiciones copulativas. Entonces, si hemos de usarlo de modo diferente, bajo qué condiciones, cuáles son los límites que no podemos transgredir: esto nos lo enseña el principio de Heisenberg y la complementariedad.

En fin, las escasas referencias ontológicas de Bohr nunca las realiza acerca del mundo clásico y sí a la naturaleza y a las leyes, que la describen, poseedoras de propiedades cuánticas. De ahí que la presencia en sus escritos de dos mundos (clásico y cuántico) sólo obedece a la necesidad epistemológica de describir en el lenguaje de la física clásica las propiedades de un solo mundo, cuya naturaleza es cuántica. Pero, *¿por qué esta necesidad?* Porque el lenguaje clásico, con sus conceptos, coincide con nuestra forma humana de conceptualizar la experiencia: espacio-temporalmente.

En conclusión, y en última instancia, aquello que define al fenómeno cuántico, no es sólo el tipo de dispositivo que se utilice, lo cual determinará el comportamiento del objeto cuántico: o bien ondulatorio, o bien corpuscular; además de esto el *fenómeno de Bohr es el resultado de definir al objeto por medio de términos* (conceptos, magnitudes y

propiedades) *clásicos*. He aquí la división entre dos mundos; una *dicotomía* sólo *epistemológica*, que se debe a la imposibilidad de renunciar a la terminología clásica a la hora de ofrecer una descripción de la realidad.

Ahora bien, como tales términos clásicos se construyen todos a partir de las nociones espacio-temporales, en este sentido, la determinación fenoménica de las propiedades objetivas del mundo microfísico significa que, a pesar de reconocer el fracaso de la descripción espacio-temporal, ésta es necesaria para definir el fenómeno.

Bohr dice que la posibilidad de reconciliar el fracaso y la necesidad del espacio y del tiempo, está en considerar a todas las determinaciones fenoménicas del objeto como meras analogías sobre el lenguaje clásico.

No obstante, yo voy más allá, con el objetivo de fundamentar su propuesta analógica y simbólica, con lo cual se resolvería dicha antinomia entre el fracaso y la necesidad de las intuiciones espacial y temporal, y afirmo que si el fracaso es sólo parcial se debe a que una de las dos intuiciones no ha fallado; ésta es la temporal y a partir de ella es posible recuperar la espacial, aunque sólo de la manera analógica, que propone el propio Bohr. Y no sólo esto, sino que, además, el tiempo puede ser el determinante de los objetos cuánticos y aquello sobre lo cual se ha de redefinir el materialismo de éstos.

b) El materialismo de los “objetos cuánticos” y sus condiciones de posibilidad como objetos

¿Qué puede decir la física cuántica y la complementariedad de la materia y de los objetos atómicos? Para responder a esta pregunta se ha de aclarar el concepto de “objeto material” y la primera pista, de nuevo, vuelve a darla Einstein, quien afirma que «el concepto de objeto material es una libre creación de la mente humana desde el punto de vista lógico».

Por lo tanto, por un lado, si el objeto material es una libre creación de nuestra mente, cuya validez reside en el grado de comprensión que nos aporta de la experiencia, y, por otro lado, tenemos que la concepción clásica de objeto (onda o corpúsculo) no nos ayuda a comprender la realidad del mundo microfísico, entonces deberíamos intentar construir un nuevo concepto de objeto material que sí haga comprensibles los resultados experimentales de la mecánica cuántica.

En este aspecto, lo primero que se señalaría es que el materialismo cuántico no puede definirse como el clásico, en tanto que éste le asigna la propiedad de la extensión, unidad y continuidad en un espacio euclídeo

(cuyas partes son *homogéneas*, constituyendo una unidad, y se *extienden*, a través de él como marco único, de manera *continua*, haciéndole infinitamente divisible). Por ello el objeto cuántico no tiene una representación en este tipo de espacio, con lo cual se explica que no posea una localización espacio-temporal en él.

Además el espacio definido en términos clásicos servía de principio diferenciador para la materia, otorgando así un principio de individualidad y discernibilidad de las partículas materiales; pero si el espacio no es homogéneo ni de extensión continua (divisible indefinidamente), la materia cuántica no tiene por qué diferenciarse entre sí ni mantener aquella individualidad “clásica”, que separaba espacialmente a los sistemas físicos, compuestos de esta materia.

Por lo tanto, si las propiedades del espacio real no coinciden con las propiedades del espacio clásico, tenemos que las propiedades clásicas, que en él se basan (como posición y velocidad) sólo pueden ser fenoménicas; de ahí que la autonomía del objeto clásico no tenga sentido en física cuántica, ya que todas las propiedades mecánicas dependen de la observación en tanto que no son objetivas, lo cual nos conduce a una concepción indeterminista y probabilista de todo conocimiento que se obtenga a través de aquéllas.

En realidad, en tanto que la materia se define primordialmente por la extensión, encontramos que la materia, el objeto y la realidad física se definen en función de las características espaciales que se estén manejando. Si éstas cambian, la materia no puede seguir concibiéndose bajo las propiedades espaciales que ya no se manejan; la conceptualización espacial es distinta ahora y por ello el objeto material, entendido bajo las condiciones anteriores, no tiene sentido.

No obstante, si partimos de otras características, o al menos de tomar conciencia que las anteriores ya no tienen validez, podemos construir una noción de objeto material distinta, que sí pueda entenderse bajo otras determinaciones y éstas serán las que se derivan de la intuición temporal, a las cuales conducen las siguientes tesis.

1) Es innegable que el tiempo existe como un proceso temporal de un tipo u otro; pero, aunque se pudiera negar desde una refinada argumentación filosófica, desde luego que esa negación no se podría extraer de ningún fundamento epistemológico ni físico (matemático) de la teoría de los cuantos: la física cuántica no *arremete* contra el tiempo. Asimismo, es cierto que ésta tampoco niega la existencia de la exterioridad del espacio; sólo niega la objetividad de *un tipo de espacio*, el *euclídeo*, a la vez que expone la falsedad de la concepción espacial de los objetos tal cual

es en la realidad; esto es, niega la capacidad de una teoría física de ofrecer una representación plástica, especular y visual del mundo basada en el espacio gnoseológico⁹⁶: el espacio euclídeo ni representa ni es una representación pictórica de la realidad; sólo puede servirnos de “representación simbólica”.

2) Esto implica que la idea de la materia en el espacio, en tanto con una posición fija como móvil, no se corresponde exactamente con la espacialidad real de la materia, la cual, si existe, nos es y será directamente inaccesible en su totalidad. Sólo puede hablarse de un modelo espacial intuitivo, físico o material, de la naturaleza por “analogía” a lo que realmente les sucede en este mundo a los fenómenos y a los sistemas físicos. La única vía directa que nos abre a él es la del tiempo, aunque es insuficiente, por sí solo, para hablar de modelo intuitivo de la realidad o mundo físico como representación.

3) Por lo tanto, cuando Bohr dice que sólo podemos usar los conceptos descriptivos de la física clásica por analogía, la forma como esta analogía se aproxima a la realidad, que concibo, es siguiendo los rasgos de la temporalidad: como intuición capaz de conectar con aquélla y de ofrecer modelos o representaciones simbólicas de aquellas propiedades espaciales no euclídeas, que sólo podemos entender al modo euclídeo, el de la física clásica. En cambio, es, precisamente, este espacio de nuestra percepción aquello que distancia a la representación analógica de ser una representación pictórica o isomórfica, pues la realidad, que la física cuántica describe, no tiene propiedades espaciales euclídeas.

Todas estas tesis serán las que justifique a continuación, partiendo de las condiciones objetivas o determinaciones del objeto atómico que pueden extraerse tanto de la física cuántica como de la noción de tiempo en tanto elemento objetivo, perteneciente y determinante de la realidad, y subjetivo, perteneciente a nuestro conocimiento. Si ambas coinciden, no existen, entonces, argumentos filosóficos en contra del contenido intuitivo de la física cuántica y de la completud del tipo de descripción que ofrece de la realidad, a través de un “realismo simbólico”.

Primera condición de posibilidad o determinación del objeto cuántico: la *determinación* de las propiedades físicas del objeto cuántico es de naturaleza *fenoménica*. En otras palabras, su primera condición de

⁹⁶ Sin olvidar que esta incapacidad del espacio euclídeo también abarca a la concepción determinista del mundo físico, con lo cual se niega la capacidad de las propiedades mecánicas de representar el movimiento, tal cual se produce en la realidad.

posibilidad objetiva es que los objetos microfísicos sólo se manifiestan a través del fenómeno.

Es decir, sus condiciones de posibilidad de existencia objetiva y externa *dependen* de las condiciones de posibilidad subjetivas de nuestro conocimiento del objeto. En el caso de Bohr, la determinación fenoménica del objeto se debe a la mediatización del dispositivo de medida, entre el objeto en sí y el conocimiento que podemos tener de él. O dicho de otro modo, entre el objeto y su manera de manifestarse a través de dichos dispositivos⁹⁷.

Pero, ha de tenerse en cuenta que tal interrelación tiene como resultado que el objeto se nos manifiesta, y así nos lo representamos, a través de conceptos y características clásicas, en cuyos términos se construyen y se definen los dispositivos experimentales (de naturaleza macroscópica).

Es decir, tenemos una manera universal de representarnos la realidad física, la materia, los objetos, y es a través de la intuiciones del espacio y el tiempo. Sin embargo, esta forma de ordenación de nuestro intelecto, con la que conceptualizar, representar, describir y hablar sobre la realidad, no se corresponde con la forma con la que la propia realidad se “ordena” a sí misma; por lo tanto, ésta no se nos “manifiesta” en dichos términos, a no ser que revisemos dicha manifestación, o representación, reconociendo que no se realiza salvo analógicamente, y nunca de manera ostensiva: no tal cual es, sino de un modo *parecido* a como la realidad es; pero nunca exacto.

Pero, si una analogía es una pseudo-imagen, que se *aproxima* a lo que la realidad es sin llegar a representarla pictóricamente, entonces se ha de responder a la siguiente pregunta: *¿a qué rasgos de la realidad se aproxima y de cuáles se distancia?*

Según la tesis que en este trabajo propongo, la “imagen analógica” de la realidad se distancia y se separa de ésta en que utiliza modelos espacio-temporales que no pertenecen a la realidad, sino sólo a nuestra forma de percibir, de organizar y comprender tal realidad; por ello, las propiedades espacio-temporales, y todas aquellas magnitudes mecánicas que en éstas se basan, son fenoménicas y no objetivas. Las propiedades objetivas de los sistemas físicos sólo entran en contacto con los dispositivos de medida para interactuar con ellos y dejar definidas las propiedades

⁹⁷ En el caso de Kant, esta mediatización viene a través del carácter subjetivo intrínseco a la naturaleza de las intuiciones, en tanto condiciones de posibilidad de nuestra sensibilidad (experiencia) que, asimismo, contienen las condiciones de posibilidad del objeto material.

fenoménicas espacio-temporales, pero nada más; es decir, son irrepresentables en estos términos espacio-temporales, que son las condiciones de posibilidad de nuestro entendimiento; pero en física cuántica no lo son del objeto.

No obstante, si las “analogías bohrianas” no se asemejan a la realidad objetiva en las características espacio-temporales, *¿en qué lo hacen?* El objeto y su imagen analógica, la analogía, sólo llegan a “tocarse” a través de un puente simbólico, edificado a partir de la intuición temporal, que permite la correspondencia entre estructuras espaciales de forma simbólica y no isomórfica con la realidad; esto es, aquella permite una conexión “real” entre dos estructuras espaciales heterogéneas: la de nuestra forma de percibir y aquella otra en la que se inscriben los sistemas atómicos. Para demostrar esta posibilidad se ha de tener en cuenta la segunda condición objetiva o determinación del objeto cuántico.

En otras palabras, el espacio y el tiempo son elementos fenoménicos, en el sentido de Bohr, con lo cual no son intuiciones en sentido kantiano, ya que éstas son, además, elementos objetivos del fenómeno; sin embargo, aquello que aquí defiende es que el tiempo sí debe conservar dicho carácter como elemento intuitivo: la representación simbólica, en términos analógicos, que propone Bohr sólo puede justificarse, desde un juicio realista, si se defiende la capacidad intuitiva, en tanto elemento objetivo de la realidad extralingüística, del tiempo; ésta es la segunda condición objetiva. Éste facilita y posibilita que la descripción espacio-temporal analógica, basada en propiedades fenoménicas (en sentido de Bohr), tenga validez objetiva y sirva como representación real, aunque simbólica, del mundo físico, porque pertenece a él y lo determina.

Segunda condición: la presencia de *elementos objetivos* en la teoría cuántica está garantizada por la *intuición de tiempo*.

El comportamiento físico de los objetos cuánticos no cumple los requisitos físicos de la espacialidad (ni de la materia espacializada), así como tampoco sus requisitos filosóficos. La congruencia de ambos tipos han de conformar las condiciones de posibilidad del objeto y del conocimiento; esto es, sólo pueden coincidir si la espacialidad es euclídea, ya que es esta geometría la que coincide con la percepción humana del espacio y de la forma o figura de los objetos.

No obstante, dicho comportamiento de éstos sí se ajusta a los requisitos filosóficos y físicos que fija la intuición temporal. El tiempo, en tanto intuición, puede mantenerse como condición de posibilidad de los objetos, ya que los requisitos físicos no entran en conflicto con los requisitos filosóficos, que establecen las condiciones de posibilidad de

nuestro conocimiento. Es decir, si bien el espacio, como condición de posibilidad del conocimiento, ha de ser euclídeo y éste no coincide con el espacio físico, como condición de posibilidad de los objetos cuánticos, el tiempo, en tanto sucesiones, frecuencias, series, orden y regularidad física (leyes), sí coincide como condición de posibilidad de los objetos (condición objetiva) a la vez que condición de posibilidad de nuestra forma de conocerlos (condición subjetiva).

Sin embargo, para justificar que tal condición se respeta en el marco de la complementariedad, hay que asegurar que tales características del tiempo se determinan, y se hacen posibles, gracias a los tres “modos del tiempo”, o formas de manifestarse: permanencia, sucesión y simultaneidad. Si la física cuántica puede basar su capacidad intuitiva en el tiempo, ha de respetar estos tres modos temporales, ya que esto significaría que en ningún modo la nueva teoría atómica arremete contra el tiempo, en tanto forma de la intuición⁹⁸. Ciertamente, en física cuántica se introdujo de nuevo el factor de *simultaneidad* (tiempo absoluto) con la ecuación de Schrödinger, que Einstein había eliminado en su teoría de la relatividad.

La *sucesión* tampoco es un problema para ella en tanto que también la contempla como elemento de la irreversibilidad de la medición cuántica. De tal modo que las percepciones (observaciones) sucesivas son aún más necesarias en esta física que en la clásica. Dice Kant:

“Sólo en el tiempo, es decir, sucesivamente, pueden hallarse en *una cosa* las dos determinaciones contradictoriamente opuestas”⁹⁹.

¿Acaso éste no es el aspecto que precisa la complementariedad para asumir la contradicción de los modelos de onda y corpúsculo? Recuérdese que era precisamente eso cuando Bohr defendía que ambas representaciones son dos descripciones, que se excluyen empíricamente por pertenecer a dos observaciones (fenómenos) sucesivas y distintas, a pesar de complementarse teóricamente para formar una única “*cosa*”: el objeto cuántico.

Ahora bien, el problema puede estar en el tercer modo de manifestarse el tiempo, esto es, a través de la *permanencia*. No obstante, las

⁹⁸ Es decir, en tanto condición “subjetiva” de posibilidad de nuestro entendimiento, análisis al que dediqué los argumentos de los primeros epígrafes, y en tanto condición “objetiva” de posibilidad del objeto cuántico, hecho del que ahora me ocupo.

⁹⁹ KANT, I., Crítica de la Razón Pura, A48-B49. El subrayado de la cita es mío.

determinaciones relacionadas con la permanencia¹⁰⁰, quizás puedan mantenerse en física cuántica, a pesar de las relaciones de indeterminación referidas al tiempo, si se sustituye el concepto de “sustancia” por el de “fenómeno bohriano” (y no kantiano). Así referiremos la permanencia al fenómeno en lugar de «al sustrato de todo cambio de los fenómenos»¹⁰¹, que para Kant es la sustancia. Ahora, tal sustrato sería el fenómeno de Bohr y no el fenómeno kantiano que sí necesita de esa sustancia como sustrato.

La “sustancia” se sustituye por el “fenómeno”, que es inmutable tal cual, y los “accidentes” por las “observaciones”, que se han realizado de él, del fenómeno, a través de *distintos* aparatos de medida. De manera que las observaciones cambian porque cambian dichos dispositivos, preparados para medir una u otra característica del fenómeno, pero que todas ellas le constituyen como tal y en su unión se da el fenómeno inmutable; por este motivo está justificado identificar el “sustrato” con el “fenómeno”. Esto, que, ciertamente, entra en conflicto con el concepto kantiano de sustancia, no contradice la definición o explicación de Kant acerca de la permanencia:

“[la permanencia es] lo único que puede representar la unidad del tiempo, es decir, la identidad del sustrato, que es donde todo cambio posee una unidad completa”¹⁰².

Así, una vez establecida la segunda condición de los objetos, el tiempo asegura la tercera determinación de éstos, al ofrecer la posibilidad de construcciones espaciales simbólicas, que no tienen por qué ser euclídeas, ni conformar un modelo geométrico definido.

Tercera condición: el tiempo permite las *construcciones espaciales simbólicas*, que no tienen por qué ser euclídeas ni conformar un modelo geométrico definido.

En este punto se ha de recordar los dos tipos de fundamentación intuitiva, la espacial y la temporal; en otro lugar ya defendí que la primera es la que mejor define la postura de Einstein, aquí concluyo mi demostración de que la segunda es la única que puede dar cuenta de la propuesta de Bohr.

¹⁰⁰ Expresadas por Kant en las páginas 215 a la 220 de la Crítica (A182-189; B225-232).

¹⁰¹ KANT, I., Crítica de la Razón Pura, A184-B227.

¹⁰² KANT, I., Crítica de la Razón Pura, A186-B229.

1) Cuando el contenido físico de una teoría, y su marco conceptual, está basado en la *intuición espacial*, obtenemos, o bien, *modelos visuales* o especulares de la realidad (como los del materialismo clásico), o bien, *modelos analógicos espaciales*, como los que propone Einstein, basándose en una correspondencia directa de un tipo de espacio sobre otro; de tal forma que el modelo espacial que ofrece la geometría de Riemann acerca del mundo macroscópico, el Universo a gran escala, no es directamente representable en un plano euclídeo, que es el que coincide con el espacio de nuestra percepción, por ello no fundamentará su realismo desde un modelo especular, pero sí espacial porque defiende una correspondencia entre las dos geometrías: podemos llegar a representarnos euclídeamente el espacio no euclídeo a través de un modelo analógico, donde las características espaciales de la geometría no euclídea pueden llegar a transformarse en propiedades espaciales euclídeas, aquéllas que nuestras formas de entendimiento emplean para realizar representaciones pictóricas. Pero, insisto, que ya con Einstein han perdido su capacidad de representación pictórica directa, sólo representarán así la realidad de manera indirecta; por decirlo de un modo breve, serán “analogías espaciales a partir del propio espacio”, el cual es un espacio nuevo, el de Riemann, no directamente representable en la geometría de Euclides, construida sobre el espacio de nuestra percepción, pero con correspondencia matemática con él¹⁰³. Por lo tanto, aunque el representacionismo no sea directo sigue siendo “pictórico” en el sentido de mantener el espacio (en este caso no-euclídeo) como fundamento del realismo.

2) Cuando está basado en la *intuición temporal*, los modelos que la teoría nos ofrece de la realidad sólo pueden ser *modelos simbólicos*, basados en una *analogía espacial*¹⁰⁴, pero una analogía fundamentada en el tiempo y no en otro tipo de espacio (como fue el caso de Einstein). Ésta es la diferencia entre Einstein y Bohr, pues, Einstein también habla de “analogías”, pero, en absoluto lo hace del mismo modo que Bohr: sus

¹⁰³ Véase: EINSTEIN, A., “Geometría y experiencia”, cuyo análisis realicé en el capítulo quinto.

¹⁰⁴ Lo mismo piensa Kant y así lo describe Cañón Loyes: “En el caso del tiempo su representación se nos da como ilimitada para responder a su infinitud {Cf. CRP, A32/B48}. Y precisa Kant, que debido al hecho de que la intuición interna del tiempo no nos ofrece figura alguna, ese déficit se intenta subsanar por medio de analogías. Por eso, «nos representamos la secuencia temporal acudiendo a una línea que progresa hasta el infinito, una línea en que la multiplicidad forma una serie unidimensional» {CRP, A33/B50}, la serie numérica”. CAÑÓN LOYES, C., La Matemática. Creación y descubrimiento. Universidad Pontificia Comillas (UPCO), Madrid, 1993, p. 157.

posturas fueron irreconciliables y Bohr jamás admitió que pudiéramos formarnos un modelo espacial de la realidad por analogía a otra concepción del espacio; de tal forma que la “analogía” ha de buscar otro fundamento y sólo nos queda el tiempo como intuición.

Si el espacio no es *intuición* significa e implica que nuestras representaciones espaciales, y con ellas al menos la geometría euclídea, no son físicamente reales; es decir, no le pertenecen al objeto cuántico en tanto condiciones objetivas, pues sus condiciones de posibilidad no son las de nuestra forma de estructurar espacialmente la realidad. Por lo tanto, todas aquellas propiedades y conceptos basados en tal elemento gnoseológico, del cual nuestro entendimiento, percepción y descripción del mundo no pueden prescindir, sólo pueden mantenerse con un carácter simbólico, sin realidad objetiva.

Estas propiedades no pertenecen a la realidad físicamente independiente, sólo al fenómeno: los dispositivos experimentales (de características clásicas espacio-temporales) actúan sobre el objeto atómico, que carece de dichas características, provocando la determinación de éstas. Así aprehendemos al objeto, a través de la observación-medición; pero sin olvidar que no le pertenecen, pues sólo le definen simbólicamente: sólo son analogías de la realidad que no la representan tal cual es como condiciones, reales u objetivas, de posibilidad de los objetos.

Sin embargo, la facultad que la intuición temporal tiene de ofrecer otros tipos de representaciones espaciales, que se corresponden simbólicamente con la realidad, permite tender un puente entre las condiciones de posibilidad de nuestro entendimiento (descripciones espaciales) y las condiciones de posibilidad del objeto. Un puente que no es directo, sino simbólico; pero con la validez objetiva que garantiza el tiempo. Esta tercera condición merece un análisis a parte, porque introduce en la categoría de “objeto cuántico” dos elementos tan novedosos como conflictivos.

c) El fenómeno en tanto imagen simbólica del objeto cuántico y la espacialidad objetiva

En primer lugar, veamos si la tercera condición puede ser asumida por la complementariedad. La física cuántica reza así: *el espacio interatómico es discontinuo porque las órbitas electrónicas son discretas y están cuantizadas, de modo que un electrón realiza el cambio de órbita a través de un “salto” en el espacio.*

Sólo podemos pensar, o interpretar, esta afirmación más que del siguiente modo: el espacio físico, real, sólo tiene propiedades euclídeas de manera “*intermitente*” porque mientras permanece en su órbita, esa pequeña región espacial confinada, podemos atribuirle características euclídeas; sin embargo, si consideramos todo el espacio interatómico en su globalidad, esto es, el espacio que hay dentro de las órbitas y el que debe haber entre ellas, nos encontramos con que aquellas características aparecen y desaparecen en función de si el electrón permanece en su órbita o si cambia de una a otra. Aquí es dónde se da la *discontinuidad* del espacio físico y, por ende, una forma de *heterogeneidad*.

Esta condición espacial establece que la materia de los objetos cuánticos no puede tener las características que el atomismo materialista le asignaba; ha de ser una materia de tal tipo que permita que los objetos microfísicos, aun siendo materiales, puedan “moverse” fuera del espacio, es decir, fuera del espacio euclídeo¹⁰⁵.

Tal exclusión del espacio euclídeo nos deja sin el modelo de materia del atomismo clásico, pues implica que el materialismo cuántico no puede geometrizar la materia siguiendo el modelo euclídeo; esta materia ha de ser entendida de un modo distinto y para ello hay dos caminos: o la definimos sin geometrizarla o buscamos un modelo geométrico no euclídeo.

Pero, volviendo a las características del espacio cuántico, donde se dan los fenómenos microfísicos, además de ser discontinuo y heterogéneo, para ser (esto último en todo su sentido) tendría que ser curvo (más de tres dimensiones), al igual que en la Relatividad, en el caso de que se pudiera geometrizar el mundo atómico. Sin embargo, su característica de discontinuidad parece ser que lo incapacita para ajustarse a un modelo

¹⁰⁵ Como los ángeles, en la religión cristiana, las partículas atómicas pueden trasladarse por el espacio “a saltos”, su movimiento está cuantizado, pero la explicación teológica no nos sirve aquí, ya que los ángeles no *habitan* en el espacio dada su inmaterialidad; sin embargo, los átomos son materiales y decir que pueden cuantizar su movimiento porque no pertenecen al espacio exige especificar que este espacio, que no *habitan*, es el euclídeo, por tanto se ha de defender la existencia de dos tipos de espacialidad, uno euclídeo y otro distinto que, además, es el espacio físico, real. Por su parte, la teología también tiene problemas con esto porque si los ángeles no son materiales son espirituales, pero qué clase de inmaterialidad o espiritualidad poseen si Dios sólo insufló alma a los seres humanos; por tanto, se ha de defender que alma y espíritu son dos tipos diferentes de inmaterialidad, lo cual implica que si se da algún caso en el que el movimiento no se define por la traslación continua en el espacio del objeto material es porque, o bien dicho móvil no es material y por ende no es espacial, o bien porque su espacialidad es de un tipo distinto a aquélla que sí permite definirlo como traslación continua.

geométrico, cuya condición, como afirman muchos matemáticos, ha de ser la continuidad espacial¹⁰⁶.

En segundo lugar, mi tesis sobre la tercera condición de posibilidad del objeto cuántico obliga a aceptar que el fenómeno de Bohr es su *imagen simbólica*, que se obtiene en la descripción del objeto atómico por parte de la teoría cuántica, por las siguientes razones:

- 1- Es la unión del objeto con el dispositivo de medida macroscópico.
- 2- El dispositivo de medida se define y se construye conforme a las leyes clásicas.
- 3- Las leyes clásicas incluyen descripciones espacio-temporales de los fenómenos ordinarios.
- 4- Tales descripciones pueden realizarse en lenguaje cualitativo porque se emplea un concepto de espacio que se corresponde con ese espacio que podemos percibir y representar figurativamente a través del lenguaje natural.
- 5- Este lenguaje natural es una extensión de nuestro pensamiento o entendimiento porque comparten las mismas estructuras.
- 6- Por lo tanto, por un lado tenemos el objeto, que es irrepresentable tal cual es en términos espacio-temporales, por otro lado, el dispositivo, que es la ejemplificación de las condiciones de tal representación. De ahí que el fenómeno sea la unión de las condiciones de posibilidad del objeto más las condiciones de posibilidad de nuestro entendimiento.
- 7- Pero, dado que estas condiciones son heterogéneas entre sí, la única manera de combinarlas en una descripción es a través de un medio simbólico que no se compromete con una representación exacta y pictórica de la realidad, lo cual nos permite usarlos de forma complementaria. Tales condiciones ahora no coinciden como sí ocurría en física clásica y la razón última de esto es que el espacio de nuestra percepción, el de las representaciones pictóricas, no sirve de marco para el mundo cuántico, pues los fenómenos atómicos no respetan las condiciones impuestas por él: en concreto, la inseparabilidad es la máxima violación de tales condiciones.

¹⁰⁶ Sin embargo, hay estudios que proponen la discontinuidad a la base de la geometría, como es el caso de las llamadas “geometrías no-conmutativas”. Lamentablemente, he de dejar para otra ocasión analizar la posibilidad de construir un mapa topológico de un espacio discontinuo, como es el interatómico, ya que tal estudio es demasiado amplio para incluirlo aquí.

De modo que, cuando en física cuántica se utiliza una descripción espacio-temporal del fenómeno, o un modelo pictórico (como puede ser el de onda o el de partícula), estamos dando una representación simbólica en el espacio empírico de algo que es espacialmente irrepresentable de manera directa u ostensiva: en realidad, aquello que hacemos es adaptar las condiciones del objeto a las condiciones de la representación ordinaria para obtener una descripción del objeto en términos de tal percepción. Pero, por esto mismo, no es extraño que tal descripción no sea clásicamente realista, o pictórica, y que pueda resultar ambigua si se toma en dicho sentido.

Ahora bien, estas construcciones simbólicas en el espacio de nuestra percepción *¿qué origen tienen? ¿se trata de otro tipo de espacio que no es el empírico?* En la teoría de la relatividad hay una geometrización de la teoría física en función de la geometría de Riemann; en física cuántica no se ha realizado una geometrización de esta naturaleza. No sabemos, con seguridad, si puede haber una geometría que se adapte a las condiciones de discontinuidad cuántica, a partir de la cual pudiéramos realizar una sencilla correspondencia entre espacios; sobre esta cuestión sólo se pueden proponer hipótesis. Sin embargo, aquello que sí es cierto es que tiene un formalismo matemáticamente correcto, lógicamente coherente y no falsado experimentalmente, que ha de mantener algún tipo de contenido físico para que su descripción no sea instrumentalista.

Sólo podemos recurrir a una fórmula intuitiva del tiempo para defender el llamado “realismo cuántico”: si la física cuántica tiene un contenido intuitivo, que la pone en correspondencia con lo que la realidad es en sí misma, esto es, si esta física mantiene un compromiso ontológico que la convierte en una teoría realista, que va más allá del instrumentalismo y del fenomenismo, no del fenomenismo de Bohr que sólo lo defendió como punto de partida pero que no todo se reducía a él, sino del fenomenismo más estricto y deleznable, si esto es así, es porque aún nos queda la intuición temporal como puente entre el conocimiento teórico y la realidad.

Tal compromiso ontológico de la física cuántica a través de lo que llamaron el “contenido intuitivo” sólo puede defenderse y fundamentarse en el tiempo como elemento intuitivo, perteneciente a la realidad y a nuestro intelecto, ya que es el único, frente al espacio, que mantiene su carácter de condición de posibilidad del conocimiento y de condición de posibilidad de la realidad externa.

En física cuántica, ya no podemos percibir ni definir la “forma” de los objetos materiales desde el espacio como elemento determinante de la estructura material, por tanto, no es posible figurar objetos, dar una

representación espacial exacta y veraz de ellos, tal cuales son. Pero sí podemos *percibir su forma* a partir de la intuición temporal: esto es una manera de decir que es posible la representación no-espacial de los objetos atómicos; no es una representación espacial, pero, no por ello deja de ser un tipo de representación.

Sin esta posibilidad de representarnos el mundo de alguna manera, diferente a la representación figurativa, pictórica, espacialmente ostensiva, clásica, o como se la quiera llamar, no cabría hablar de ningún tipo de compromiso ontológico de la complementariedad y, por ende, el llamado “realismo cuántico” “realismo simbólico” o “realismo moderado” no tendría ningún significado; sería una expresión vacía, lo cual nos llevaría a hablar de un único realismo imperante: el clásico, el realismo de las representaciones espaciales, de las figuras materiales.

Ahora bien, si se quiere dar cabida a otra posibilidad realista, que destrone al realismo anterior en el reino de la física, se han de considerar cuáles son las condiciones de posibilidad de los objetos atómicos, cuáles son sus propiedades y son notas distintivas; en otras palabras, se han de establecer las condiciones ontológicas de los objetos físicos, que son materiales, por definición, pero cuya materialidad ha de redefinirse, ya que no coincide con las determinaciones espaciales del materialismo clásico: los objetos materiales de los que nos habla la física cuántica desafían las leyes geométricas del espacio, euclídeo y kantiano; la materialidad no se define desde la espacialidad.

Pero si los átomos, aún siendo innegablemente materiales, no pertenecen al espacio (al espacio en sentido euclídeo y kantiano) como toda materia entendida en sentido ordinario, *a qué clase de espacio pertenecen, ¿es el espacio de configuración, el espacio de Hilbert, algo más que una abstracción matemática? ¿Podría aplicarse algún tipo de geometría no-euclídea a este espacio cuántico? ¿Si el espacio euclídeo no es real desde el punto de vista cuántico, puede haber algún otro tipo de espacio que sí lo sea?*

No puede hacerse una ontología sin referirse a un espacio; la intuición temporal no es suficiente, pero sí es necesaria a la vez que es capaz de facilitarnos un tipo de relación espacial, una relación con el espacio euclídeo: esta relación es simbólica y no realista; pero aquello que sí es realista es su configuración temporal. ¿Es esto suficiente? O quizás se necesite, para completar el marco ontológico del microcosmos, un realismo espacial no-euclídeo sobre el mundo atómico, una reconstrucción geométrica de éste, una topología cuántica del espacio-tiempo. Aunque

tuviéramos estas imágenes, no serían imágenes clásicas, figuras geométricas en un espacio plano de sólo tres dimensiones.

Tal geometrización no nos devolvería a la ontología tradicional ni al realismo tradicional de la física ni al materialismo clásico; pero, podría ser una explicación de por qué la materia, a nivel cuántico, desafía las leyes de la geometría euclídea, de la espacialidad entendida en sentido ordinario y de por qué las únicas imágenes espaciales que podemos tener son de carácter simbólico, símbolos figurativos, espaciales o pictóricos, contruidos en nuestra mente, por nuestro entendimiento, por analogía al único espacio que podemos percibir empíricamente e incluso el único que podemos intuir, el único que se nos presenta al entendimiento de manera clara y distinta como una percepción inmediata, pues los espacios no-euclídeos sólo pueden ser intuitos temporalmente, no espacialmente, tal percepción espacial de éstos no es inmediata: sólo podemos obtenerla tras elaboradas construcciones matemáticas, que, precisamente, tiene un carácter temporal.

Pero, entonces, si esto es todo lo que puede decirse de los objetos materiales, *¿qué tipo de ontología propone la complementariedad? ¿cómo puede entenderse la materia, a nivel cuántico?*

d) Conclusión. Una propedéutica ontológica para la filosofía de la complementariedad

La complementariedad acabó con la ontología tradicional, que había acompañado a la Física en los siglos anteriores, y, sin embargo, dicha interpretación apenas ofreció una alternativa. El objetivo de este trabajo ha consistido en buscar esta alternativa, para lo cual me he basado en los argumentos siguientes.

Para Bohr el espacio y el tiempo son “formas de intuición”; esto es, son elementos necesarios para estructurar, entender y explicar la realidad natural.

No obstante, también son “conceptos fenoménicos”, dado que todas las propiedades físicas, incluidas las propiedades espacio-temporales, son fenoménicas; a saber, que sólo pueden precisarse, esto es, estar bien definidas, de forma inequívoca y, por tanto, objetiva, a partir del proceso de observación-medición.

De modo que la Física no puede salir de este reducto fenoménico si quiere conservar la objetividad, en el sentido de Bohr: aquélla no puede

afirmar nada con sentido, de forma inambigua, acerca de una realidad extra-fenoménica o interfenoménica.

Por esta razón, Bohr piensa que no puede hablar de ontología ni ir más lejos de dónde ha llegado con su marco epistemológico de la complementariedad. Sin embargo, que el *entendimiento*, por utilizar la terminología kantiana, o la *inteligencia*, si se prefiere el término de Bergson, o, simplemente, la *ciencia*, no sea capaz de aprehender esa “realidad allende”, más allá del fenómeno, no implica, en modo alguno, que la “razón kantiana” o la “intuición bergsoniana” no pueda transgredir estos límites, que el dogmatismo científico extrapolan a toda la actividad intelectual.

Aún más, la complementariedad necesita ir más allá de la pura epistemología si no quiere quedarse en un planteamiento fenomenista. De hecho, Bohr se pronunció siempre como un pensador y un físico realista; pero este realismo sólo pudo postularlo y no lo justificó, dado que, según declaraciones suyas, no poseía los medios intelectuales necesarios para ello. Por esto, Einstein se negó a admitir el realismo de la física cuántica, ya que la interpretación de este formalismo sólo se justifica desde la tesis fenomenista de Bohr. Es cierto que se ha de suponer la existencia de la realidad independiente, como sustrato del mundo fenoménico, para que la complementariedad tenga sentido; pero tal apelación no es suficiente para Einstein, pues basta con negarle ese sentido y, con ello, pierde toda validez. Este físico desarrolló, en cambio, una teoría del conocimiento científico, acerca del origen, formación y significado de los conceptos físicos, para fundamentar su crítica a la complementariedad; pero, no obtuvo ninguna respuesta por parte de Bohr.

En este trabajo propongo esa posible respuesta a Einstein, dado que Bohr se equivocó al no contestar a su interlocutor de la Polémica en sus mismos términos. Puesto que, al adentrarse en la Filosofía, las reglas para “hablar con sentido” de la realidad extralingüística no son las mismas que las que imperan en la Ciencia. La razón discursiva del saber filosófico tiene sus propias condiciones, en las que no se incluye el confinamiento positivista del conocimiento empírico a través de nuestras percepciones sensoriales. Es más, hemos de salir de ellas para fundamentar el esfuerzo de la Ciencia por aprehender su parcela de la realidad. Aquello que justifica esta afirmación consiste en que todos los intentos positivistas de fundamentación de la Ciencia, sin salirse de aquellos presupuestos, fracasaron a la hora de ofrecer una visión realista de aquella: ni el empirismo ni el Positivismo Lógico supieron justificar la conexión de la

teoría con la realidad y, por tanto, no pudieron salir de una interpretación instrumentalista de la Ciencia o, en el mejor de los casos, fenomenista.

Ahora bien, el análisis del capítulo sexto persigue mostrar que, para responder a la pregunta de Einstein, acerca de si la física cuántica es o no una teoría completa, con conexión con la realidad, no nos queda otro camino que el de la investigación filosófica, en tanto gnoseología y ontología. Dado que, por un lado, el análisis epistemológico de Bohr, aunque correcto, se revela insuficiente a la luz de las réplicas de Einstein y, por otro lado, porque tampoco ha servido para desentrañar esta cuestión ni el camino de la lógica, que propuso von Neumann en su teorema de completud, ni el de la experimentación.

Pues bien, comenzaré este repaso con la gnoseología, o teoría del conocimiento, aplicada a la Física. Dice Bohr que los únicos conceptos descriptivos y con contenido físico son los que se usan en las teorías clásicas, pues son los mismos que los empleados por el lenguaje cotidiano, sólo que refinados y cuantificados, esto es, matematizados por la teoría física que los maneja. De este lenguaje afirma que ya contiene la conexión con la realidad extralingüística que le capacita para describir, explicar y, a través de él, comprender el mundo que nos rodea. Es decir, según la terminología que empleo en este trabajo, los términos clásicos, en tanto nociones espacio-temporales, son intuiciones donde las *condiciones de posibilidad del conocimiento* coinciden con las *condiciones de posibilidad del objeto físico*.

El mundo clásico suponía que esta conexión se realizaba a través de un isomorfismo estructural entre los conceptos lingüísticos de la teoría y los elementos de la realidad (criterio ontológico de Einstein), lo cual le permitía concebir la descripción física de una teoría como la representación pictórica de la realidad, puesto que dicho isomorfismo se sostenía sobre el supuesto de que el carácter espacial de una y otra estructura coincidían. Ambas estructuras espaciales eran homogéneas: el espacio empírico de la geometría euclídea coincide con el espacio de nuestra percepción y a partir de éste se construye el lenguaje natural y, por extensión, el de la física clásica.

Sin embargo, la física cuántica tiene razones, lógica, matemática y empíricamente bien fundadas, para dudar de tal capacidad pictórica del lenguaje físico. El fracaso de la descripción espacio-temporal llevó a Bohr a sustituir aquel isomorfismo por una analogía: el lenguaje ya no comparte la misma forma, la misma estructura con la realidad natural. La física cuántica nos ha revelado, según Bohr, que aquella conexión entre teoría y realidad no se realiza como la física clásica suponía.

¿Cómo se realiza entonces? Por medio de una conexión analógica que, únicamente, nos ofrece una representación simbólica de la realidad, dice Bohr. Pero no añade nada más y, no obstante, queda mucho por decir. Para ello he partido de algunas de las tesis que defendieron los siguientes autores: Heisenberg y Bohr, Kant, Bergson y Hilbert.

1-Tesis de Heisenberg y Bohr sobre el contenido intuitivo: *Toda teoría física tiene un contenido intuitivo o físico que la pone en correspondencia con la realidad que está describiendo*; esto es, los conceptos descriptivos tienen un significado extralingüístico.

2-Tesis de Kant: *Tal conexión entre el lenguaje (como extensión de nuestro pensar y del entendimiento humano) y la exterioridad del mundo físico, se realiza y está garantizada por dos tipos de intuición: la espacial y la temporal*. De esta tesis kantiana, no acepto que el espacio conserve su carácter de intuición, así como tampoco su noción de “intuición pura”.

3-Tesis de Bergson: *Estos dos tipos de intuición dan lugar a dos tipos de conocimiento; la intuición espacial es el fundamento gnoseológico del conocimiento científico y la intuición temporal es el fundamento del conocimiento filosófico*. A pesar de no compartir con Bergson esta distinción ni la exclusión de la intuición temporal fuera del conocimiento científico, *sus ideas acerca del espacio manifiestan con gran claridad la importancia de éste para la descripción física, ya que no podemos renunciar del todo a él*.

4-Tesis de Hilbert (y, en general, también defendida por los formalistas e intuicionistas matemáticos): *La intuición temporal es la que fundamenta la Matemática; pero su aplicación a la realidad, a lo empírico y contingente, sólo puede venir garantizada por el “uso material de la intuición temporal”, el cual la pone en correspondencia con la intuición espacial, que es el rasgo característico de la extensión y, por tanto, de la materia*. Tesis que algunos autores consideran de corte kantiano, cuestión sobre la que no me pronuncio, ya que no es relevante para mi estudio. En cambio, aquello que sí me interesa es la tesis de que *el tiempo, en tanto estructura numérica, es capaz de conectarse con la realidad y de construir, así, un puente con ella a través de una correspondencia simbólica con el espacio*, aunque éste haya perdido, ahora, su carácter de “intuición”, propiamente dicho.

En consecuencia y gracias a estos elementos, tiene sentido afirmar que la intuición espacial es el fundamento gnoseológico del uso pictórico de los conceptos descriptivos, tanto en el marco clásico como en la postura de Einstein; la intuición temporal, en cambio, puede servir como garantía del uso simbólico de estos conceptos, que fue propuesto por Bohr. Este uso

ofrece una representación espacial analógica, con respecto al espacio de nuestra percepción, no por medio de otro tipo de espacio, pues éste no es el *punte*, sino a través del uso que podemos realizar del tiempo como intuición gnoseológica. Ambos tipos de intuición no fundamentan dos tipos de conocimientos diferentes, en contra de las ideas de Bergson, sino dos formas de obtener una representación, es decir, son el fundamento de dos usos diferentes del lenguaje y de los conceptos descriptivos.

Así pues, el uso simbólico de dichos conceptos, que no olvidemos que se construyen sobre las nociones de espacio y tiempo, se distancia de la realidad en tanto que ésta no tiene propiedades espaciales euclídeas físicamente independientes; en todo caso, son fenoménicas. En cambio, se aproxima a ella en tanto que los rasgos de la temporalidad como intuición es capaz de conectar con la realidad y de ofrecer modelos o “representaciones” simbólicas de aquellas propiedades físicamente independientes de la observación, es decir, de las propiedades “reales” de los objetos, no fenoménicas, que quizás sean de características espaciales no-euclídeas; pero, aun en este caso, sólo podríamos entenderlas al modo euclídeo y, en general, según el modelo que utilizó la física clásica.

En otras palabras, si aquel espacio no es objetivo, no puede constituirse, como sí hacía en el marco clásico, en el *determinante* de las *condiciones de posibilidad de los objetos físicos*; pues ese tipo de espacio es sólo fenoménico y apenas puede decir nada del objeto ni de la materia cuántica. El determinante de dichas condiciones sólo puede serlo aquel otro tipo de espacio, el cual, por un lado, ha de ser el que permita el uso del tiempo en tanto intuición (como estructura de la realidad y estructura de nuestro pensar) y, por otro lado, ha de ser el configurado por las propiedades cuánticas de los propios objetos materiales. Ahora, son ellas las que nos dicen cómo ha de ser el espacio y ya no es el espacio el que establece las condiciones de la materia.

Este nuevo proceso de conceptualización abriría la puerta a una ontología, basada en un tipo de espacio distinto al de nuestra percepción, cuya existencia ha sido desvelada por el conocimiento científico a través de descubrimientos matemáticos y teóricos en el campo de la física y de la geometría. Desde luego, se trataría de una ontología que no permitiría una representación objetual del mundo físico; pero sí fenoménica y, además, explicaría por qué no podemos representarnos la realidad de una manera autónoma e independiente de nuestro conocimiento.

Por este motivo digo que mi propuesta ontológica es más bien una propedéutica, un posible camino a seguir, donde el fenómeno, de naturaleza simbólica, configura la realidad que conocemos y el objeto, irrepresentable,

configura la realidad que lo sostiene y, cuya correlación, conexión o coincidencia sólo puede venir avalada por la intuición temporal, en concreto, por su uso en tanto elemento objetivo, o determinante de la estructura real del mundo físico, siendo esto lo que justifica hablar de un “realismo simbólico”, frente al “realismo pictórico” del marco clásico.

Ahora bien, si ambas físicas son incompatibles y ambas son indispensables: la cuántica por razones estrictamente científicas y la clásica por motivos gnoseológicos, entonces se nos plantea el siguiente interrogante. ¿Tenemos dos mundos inconmensurables que segmentan en dos al realismo: el mundo clásico con su realismo clásico y el mundo cuántico con su realismo cuántico? Mi respuesta es negativa. Los dos “mundos”, esto es, las dos realidades, inconmensurables, de la física clásica y la física cuántica, sólo se dice en sentido figurado, con un significado epistemológico y no ontológico, ya que aquello que es inconmensurable es el marco conceptual de una y otra, los cuales sólo pueden relacionarse entre sí a través del principio de correspondencia. El mundo es uno y es el mismo en ambos niveles de experimentación y yo defiendo que este mundo, para Bohr, es esencialmente cuántico porque si no lo fuera, nunca hubiese afirmado que el postulado cuántico es un hecho esencial de la naturaleza, de la realidad, ni tampoco que el llamado “mundo clásico”, a partir del cual construimos el lenguaje de la física, basado en nuestra sensibilidad y experiencias inmediatas, es, únicamente, una idealización de las condiciones cuánticas, que aun estando presentes en el nivel mesofísico, sus efectos son despreciables y por ello podemos aparentar que no existen. Por ello, la concepción clásica del mundo es sólo una aproximación más o menos válida según nos alejemos o nos acerquemos al nivel atómico.

De modo que no hay una diferencia ontológica, sólo epistemológica, entre lo clásico y lo cuántico. Si la inconmensurabilidad es estrictamente epistémica y no óptica, no hay, entonces, realismo disyuntivo y cuando se habla de “realismo cuántico” es sólo por oposición a la *concepción* clásica de realidad y de objetividad: la complementariedad pretende defender que la física cuántica mantiene un compromiso ontológico con la realidad, de tal forma que la concepción de realismo que de ella se desprende es la “auténtica” y, por tanto, subyace y es lógica y ontológicamente anterior al llamado “realismo clásico”. Esta concepción científica de la realidad sí está anticuada, porque ha sido desmentida por los nuevos avances científicos. Por todo esto, Bohr propone la revisión de la noción de “realidad”, de ahí mi afirmación acerca del realismo clásico, que, por ser una idealización de las condiciones cuánticas, que son las “reales”, ha de ser, para la complementariedad, una ilusión, la cual si no puede ser

erradicada del todo, sí, puede, al menos, ser descubierta, desvelada, “sacada a la luz”, para no enredarnos entre sus mallas.

He aquí lo que algunos autores llaman la “nueva revolución copernicana”: la forma como percibimos el mundo, nuestro patrón de conocimiento, el cual sigue los cánones clásicos, no le puede decir al mundo cómo ha de ser, aquél no coincide con el patrón que sigue la realidad. El “mundo clásico”, el que es directamente accesible a nuestros sentidos no es el *mundo real* y no puede servir de modelo al realismo, a aquello que la realidad es, pues ésta se ajusta a los cánones cuánticos.

Este realismo ha de luchar contra muchas cosas, hábitos, prejuicios, ambigüedades, imprecisiones; pero, sobre todo, contra un lenguaje, en el que él mismo está condenado a expresarse, que está construido siguiendo los cánones clásicos, como caso ejemplar de nuestra capacidad de pensar: del modo ineludible de percibir la experiencia, de conocer la realidad y de expresar pensamientos sobre aquélla. Éste es el auténtico drama, la tragedia de la física atómica, el cual no se resuelve negando las condiciones gnoseológicas del pensar humano, que fueron plasmadas, de manera paradigmática, en el marco conceptual de la física clásica. No importa el contenido teórico de esta física, no importan sus leyes; aquello sobre lo que no podemos pasar por alto es su carga intuitiva, pero no en cuanto se refiera a la realidad, pues ésta es negada por Bohr en favor de una concepción “cuántica” de aquélla, sino, más bien, en tanto su relación con las condiciones gnoseológicas del pensamiento humano, las cuales son ineludibles.

No podemos pensar de otra manera; pero, sí podemos modificar la concepción que nos hemos formado acerca de nuestro propio pensamiento, cambiando el modelo de inteligibilidad: percibimos la experiencia y pensamos en términos espacio-temporales, pero estos modelos, que nos hemos formado en nuestra mente, no se ajustan a lo que la realidad es y sólo podemos usarlos de una manera analógica como representaciones espacio-temporales simbólicas. Ésta es la propuesta de Bohr, la lección epistemológica de la complementariedad, el principio lógico que guía su pensamiento. Es el único camino que vio Bohr para defender el realismo de la física cuántica: un realismo muy matizado, un realismo con muchas concesiones al fenomenismo, pero comprometido ontológicamente, en la medida en que defiende la realidad de las condiciones cuánticas por encima de todo lo clásico, lo cual queda reducido, en el planteamiento de Bohr, al ámbito gnoseológico de la sensibilidad y del lenguaje humano.

En este punto surge una pregunta: si la física clásica tiene contenido intuitivo porque sus conceptos mantienen una conexión con la

realidad, entonces lo real será el mundo clásico y no el cuántico. La respuesta se halla en que el contenido intuitivo viene *no* por esa conexión con la realidad, ya que ésta no existe si la realidad es cuántica, sino por una conexión con la capacidad humana de percibir y de experimentar la exterioridad, lo que nos rodea. Aunque, ciertamente, esta respuesta puede suscitar otra cuestión: qué significa, entonces, que la física cuántica recupere el contenido intuitivo por analogía con la física clásica; no podemos hablar de la realidad porque sólo podemos expresar correctamente lo que podemos percibir y aquélla, dado que es cuántica, no la podemos percibir directamente; pero sí podemos hablar de ella a través de medios indirectos (análogos). La solución que propongo es: la intuición espacial, responsable de las representaciones pictóricas, no es un elemento de la realidad; sólo condición gnoseológica y ésta es la que se ve modificada de un marco conceptual a otro: el espacio, al menos el de nuestra percepción, no pertenece al mundo cuántico, al mundo, a la realidad y sólo podemos hacer uso de la intuición espacial en tanto símbolos espaciales y no representaciones reales.

Pero, entonces, cuál es el elemento de realidad que conserva el contenido intuitivo de la física cuántica: la intuición temporal; éste es el elemento que avala el compromiso ontológico de la complementariedad, pues ha de ser la condición gnoseológica que coincida con la condición ontológica para justificar el realismo de esta física.

Es una petición de principio, pero muy poderosa porque con ella se explica, por un lado, el hecho de disponer de un aparato matemático, altamente sofisticado, que se adapta a los fenómenos y se aplica en toda experimentación y, por otro lado, el uso análogo de las representaciones simbólicas que construimos a partir de la intuición espacial. El fracaso de la descripción espacio-temporal, de la que siempre nos habla Bohr, es el fracaso de las representaciones pictóricas, de los modelos imaginativos y especulares de la realidad; este fracaso se debe a que el espacio ha perdido su carácter objetivo y con ello su capacidad de procurarnos representaciones ostensivas en él, pues la realidad ya no se manifiesta espacialmente. No obstante, nada se dice en contra del carácter objetivo de la intuición temporal: el tiempo es una condición de posibilidad del entendimiento y del objeto, es un elemento cognoscitivo a la vez que elemento objetivo de la realidad y, además, es gracias al uso material que hacemos de él, siguiendo la doctrina intuicionista de la Matemática, como podemos reconstruir imágenes espaciales del mundo físico pero con carácter simbólico, ya que estas condiciones espaciales no pertenecen a la realidad, sólo a nuestro conocimiento de ella.

En conclusión, la ciencia necesita la intuición espacial y la intuición temporal para construir una teoría que verse sobre la realidad física. Si sólo dispusiéramos de la temporal, únicamente podríamos obtener modelos formales y matemáticos de aquélla; pero esto no es lo que se persigue. Ahora bien, la forma cómo se relacionen, el papel, la función y el orden en que cada una se sitúe y la primacía gnoseológica y ontológica que ostente y disfrute cada tipo de intuición son cuestiones a debatir.

Mi tesis es que la intuición temporal tiene una primacía gnoseológica y ontológica sobre la espacialidad; esta primacía es lo que no permite hablar con propiedad de “intuición espacial”. Y que esta idea puede adecuarse y complementar la tesis de Bohr sobre el significado analógico de los conceptos físicos, porque de la intuición temporal se puede obtener un modelo de representación espacial simbólica.

No forma parte de mi objetivo defender que tales ideas sobre la intuición temporal fueron de hecho propuestas por Hilbert o por Kant; no me importan los nombres propios a quienes podamos asociarlas. Aquello que sí me interesa es que aquéllas son congruentes y conforman una tesis filosófica que es defendible, ya que en el capítulo séptimo he expuesto las razones por las que esas ideas están fundamentadas y justificadas, desde el punto de vista filosófico. Por este motivo, la tesis, que venido defendiendo a lo largo de este trabajo, no es una solución propiamente kantiana, hilbertiana ni tampoco bergsoniana al problema de la física cuántica. Las ideas de estos pensadores, únicamente, me han servido de faro para guiarme en una propedéutica que no ha hecho más que comenzar. Seguramente, habrá autores kantianos, hilbertianos y bergsonianos que no estén de acuerdo con este resultado final, pero el punto de partida, que estos programas filosóficos posibilitan, es lo que me ha movido a incluirlos en esta investigación.

La incursión en las ideas de Bergson da como resultado la siguiente enseñanza: no podemos prescindir de las intuiciones intelectuales en nuestra indagación sobre el mundo. Pero, además, como Hilbert y Brouwer reconocieron, siguiendo ciertos elementos de la filosofía de Kant, es la intuición temporal la que sirve de fundamento a la Matemática; esas matemáticas que son el núcleo de toda teoría física y que adquieren un papel aún más importante en el formalismo cuántico. Por ello, la intuición temporal puede dar la clave para justificar la insistencia de Bohr acerca de la completud de la física cuántica, como una teoría realista del mundo atómico, a pesar del fenomenismo con el que impregna a su solución epistemológica.

La objeción más importante que puede hacerse es que, ciertamente, Bohr no separa el tiempo del espacio cuando habla del “fracaso de la descripción espacio-temporal”, por lo tanto, puede parecer que hacer esta distinción contradice la concepción de Bohr. No obstante, él siempre habló de “descripción” (espacio-temporal) cuando se refería a dicho fracaso, pero no de “intuiciones”. Es decir, el físico danés nunca tuvo en consideración más que la dimensión física de estos conceptos: espacio y tiempo como parámetros físicos, métricos. Sólo rozó la concepción filosófica, que puede manejarse de estos términos, cuando hablaba de ellos como “formas de intuición”, donde su significado no se agota en su dimensión física; pero en este caso siempre se refería a éstas en tanto que necesarias para el entendimiento humano aunque nunca llegó a profundizar en ello. El espacio y el tiempo, como “formas de intuición”, tienen, al menos, una dimensión más que la física y es la gnoseológica: esto es, la *forma cómo estos términos actúan en nuestros mecanismos cognoscitivos para ofrecernos un modelo de inteligibilidad y comprensibilidad de la realidad externa* o extralingüística, que es nuestro objeto de estudio y de curiosidad.

De este modo y como resultado de mi investigación, mi propuesta consiste en que no es extraño a la tesis de Bohr anteponer la intuición temporal a la espacial para manejar un nuevo modelo de inteligibilidad sobre el mundo natural. Su tesis sobre el significado analógico de los términos físicos conlleva este nuevo modelo de inteligibilidad, que no está directamente basado en la capacidad de visualizar el mundo: su fundamentación intuitiva no es la espacial, sino la temporal. A partir de aquí, la intuición temporal permitirá recuperar aquella capacidad, basada en la intuición espacial pero de una manera simbólica, cuyo nexos con la realidad extralingüística no es directo, sino que se realiza a través de un *medio*, que es el tiempo en tanto intuición, el cual sirve de *punte gnoseológico* entre el abstracto formalismo cuántico y nuestra forma habitual de percibir el mundo a través de imágenes espaciales, de características euclídeas y de tres dimensiones.

El resultado es un concepto físico con significado analógico; es decir, un término que se refiere a la realidad de un modo muy distinto al del marco clásico y bien determinado, esto es, su contenido empírico, físico o intuitivo, es un símbolo, construido a partir de la intuición temporal, que únicamente puede ofrecer modelos espaciales por analogía, o por aproximación, a nuestras formas de percibir la exterioridad y cuyo acercamiento, o proximidad, a aquello que la realidad es en sí misma es asintótica, es decir, *realidad y símbolo de ella* jamás llegan a coincidir.

Dicha analogía está permitida si basamos la capacidad de descripción física de una teoría en la intuición temporal, ya que ésta puede construir representaciones simbólicas en el espacio que no coinciden en tanto *condición gnoseológica* de nuestra percepción, descripción y observación de la realidad y *condición física* de los objetos que pueblan la realidad extralingüística, la realidad más allá de nuestra manera de percibirla; ambos elementos se asemejan pero no coinciden, lo cual les hace ser asintóticos entre sí.

La física cuántica se ha adentrado en un terreno tan profundo de la realidad que se ha encontrado con una verdad inquietante: el mundo físico, con toda la legalidad externa con la que se nos impone, no mantiene una perfecta correlación con nuestras formas de percepción ordinarias. El modelo de inteligibilidad, al que nos había acostumbrado la física hasta comienzos del siglo XX, ya no es válido. No es cierto que no podamos entender la física cuántica, pero sí es cierto que, para entenderla, tengamos que esforzarnos por entender de otra manera; una manera más sutil y compleja, pero que, sin duda, nos hará avanzar en la tarea de comprensión y de conocimiento del mundo, a la que nos instiga nuestra propia naturaleza humana, la curiosidad, el ansia de saber más, en este caso acerca de nosotros mismos y del mundo en el que estamos.

El nuevo modelo de inteligibilidad permite afirmar que la física cuántica no es una teoría instrumentalista, pues es capaz de explicar y describir el mundo, aunque este tipo de descripción sea distinto al de la física clásica. La descripción de ahora es menos pretenciosa y mucho más modesta que la de antes: es cierto que pone límites, pero *no prohíbe hablar de la realidad*, pues sólo está vetada una cierta manera de referirnos a ésta, la manera clásica. Nuevamente, avanzando por el camino del conocimiento, nos hemos encontrado con un hecho más, que ha azotado la altivez y la soberbia del ser humano: el Sol no gira alrededor de la Tierra; la Tierra, ni tan siquiera nuestro sistema solar, la Vía Láctea, es el centro del Universo; el Hombre no es el centro de la Creación; y nuestra forma de percibir el mundo no puede dictarle a la Naturaleza cómo ha de ser ni cómo comportarse: la capacidad humana de percibir la exterioridad no es absoluta, como suponía el marco clásico desde el representacionismo pictórico, sino que es limitada; esto es, nuestra sensibilidad no se ajusta "ilimitadamente", sin restricción alguna, o incondicionalmente, a cómo la realidad es, ya que no tenemos ninguna *autoridad sobrenatural* acerca de cómo sea la realidad.

Por ello, la tarea científica consiste en descubrir sus secretos y adaptar nuestro entendimiento y razón a los conocimientos que vamos

adquiriendo de ella. Pues, para saber más, hemos de ser modestos y aceptar la información que la naturaleza nos grita al oído cuando la interrogamos por medio de la ciencia, aunque sus repuestas no sean siempre las que nosotros esperábamos.

Einstein careció de esta modestia, pues partió de una idea preconcebida acerca de la realidad; al contrario que Bohr. No obstante, éste no supo responder a las objeciones gnoseológicas y ontológicas que, nadie como Einstein, vio y expuso tan claramente. El físico de la relatividad no tenía razón en sus objeciones ontológicas, ya que su principio de realidad es un axioma o postulado que no está justificado filosóficamente; es, como el mismo reconoció, un dogma de fe, un “credo epistemológico” sobre la realidad del mundo físico. Aunque sí la tenía en relación con su crítica gnoseológica porque sin un tipo de intuición, en el caso que yo defiendo sin la intuición temporal, a la base del contenido intuitivo de la física cuántica, esta física no tendría conexión alguna con la realidad; no estaría describiendo nada del mundo ni tan siquiera desde la perspectiva de Bohr de la doctrina del actor-espectador. En tal caso, la microfísica sería únicamente un instrumento matemático operativo, de predicción y cálculo, el instrumento más potente y preciso que jamás hayamos conocido; pero vacío de contenido *físico*, de conexión con la realidad *física*, incapaz de describir *físicamente* los fenómenos naturales. Por lo tanto, sería una teoría *incompleta*.

Pero mi conclusión es la contraria: la complementariedad tiene su apoyo gnoseológico en la intuición temporal; sin esta aportación la polémica Einstein-Bohr continuaría siendo un “diálogo para sordos”. La física cuántica ha sacado a la luz una “verdad profunda” y ninguna teoría futura podrá cambiar esto. Lo único posible es que esa hipotética teoría nueva vuelva a sepultarla una vez más bajo los deslumbrantes velos de nuevas edificaciones teóricas, relegando todos los problemas físicos, que aquí se han tratado, al ámbito más especulativo de la filosofía, que podamos encontrar. Quizás, entonces, los físicos puedan respirar tranquilos; no obstante, nada en la realidad física habría cambiado; todo seguiría igual, bajo otro camuflaje más.

En definitiva, la física cuántica, aunque en un principio no parezca una teoría satisfactoria, debe reconocerse que sí satisface los requisitos intuitivos. Llegará el día, quizás, que otra teoría física la sustituya, pero no una teoría “más completa” sino sólo mejor. Sería “mejor” porque daría cuenta de los fenómenos cuánticos más otros fenómenos aún por descubrir. Con el presente estudio no pretendo más que ofrecer una fundamentación gnoseológica, más firme y profunda, de la postura que Bohr mantuvo hacia

la física cuántica: es completa, intuitiva, describe objetiva y físicamente, explica y su explicación del mundo atómico se puede llegar a comprender y a ser comunicada a los demás. Es posible imaginar otra teoría que implique otros principios filosóficos; en realidad, esto ocurre siempre que aparece una nueva teoría con un núcleo epistemológico diferente al marco conceptual de la anterior. Sin embargo, esto no invalida la justificación gnoseológica que he atribuido a la física cuántica: no hay ninguna *razón física, lógica, matemática* (me remito a los argumentos de los capítulos V y VI), o *filosóficamente justificada* (razonamientos del capítulo VII), que impida afirmar que el nuevo tipo de descripción, que esta teoría nos ofrece de la naturaleza, pueda mantener una conexión entre nuestra forma de conocimiento, como una construcción humana, y la realidad externa, en tanto que posee una legalidad propia que se impone a nuestra aprehensión del mundo.

No se trata, insisto, de que la física cuántica haya alcanzado la “verdad última”, o la “Verdad” con mayúscula, sino de admitir que, desde el punto de vista de la fundamentación intuitiva, esta teoría puede afirmar, *justificadamente*, que ha alcanzado, en palabras de Bohr, una “verdad más profunda” que la conseguida por la física clásica.

APÉNDICE I:

«TEORÍA DEL CAMPO ÚNICO DE EINSTEIN»

Siguiendo el testimonio de Abraham Pais, la idea de Einstein de explicar los aspectos cuánticos desde una teoría de campos se remonta hasta el año 1920, e incluso a 1918. Aunque su objetivo material era unificar la gravedad y el campo electromagnético, su teoría de la relatividad y la electrodinámica de Maxwell, en su mente siempre estaba presente que la solución a los problemas cuánticos se derivara de manera natural de esta teoría de campos generalizada: «*que las partículas de la física emergieran como soluciones especiales de las ecuaciones generales de campo, y que los postulados cuánticos fueran consecuencia de las ecuaciones generales del campo*»¹.

Con la culminación de esta teoría pretendía resolver los tres problemas físicos que Einstein se planteó durante esta época: «*La tarea científica que Einstein se propuso en sus años últimos está basada en tres desiderata, todos vitalmente importantes para él: unificar gravitación y electromagnetismo, deducir la física cuántica de una teoría causal más profunda y describir las partículas como soluciones libres de singularidades de los campos continuos*»². De este modo, Einstein creía que el modelo de continuidad era la clave para interpretar el mundo físico, incluidas las partículas y así obtener una teoría del campo unificado donde también se incluiría la materia y la radiación, esto es, el campo de aplicación científica de la física cuántica.

Esta teoría hubiera sido la realización física de su programa y de su postura epistemológica, la cual debía ser una teoría causal, capaz de «*sobredeterminar las variables de campo, mediante las ecuaciones apropiadas, que serían a derivadas parciales*». De estas palabras del propio Einstein se sigue que el punto crucial es encontrar sistemas sobredeterminados, usando ecuaciones diferenciales, lo cual implicaría una supercausalidad (*Überkausalität*), dada propia definición que Einstein ofrece del término “sobredeterminación”: «*Los fenómenos parecen estar*

¹ PAIS, A., *El Señor es sutil... La ciencia y la vida de Albert Einstein*, p. 466.

² *Ibid*, p. 292.

determinados hasta tal punto, que no solamente la secuencia temporal, sino también el estado inicial, queda en gran medida fijado por la ley física. Me pareció que podría expresar esta idea buscando sistemas sobredeterminados de ecuaciones diferenciales... Creo firmemente que no llegaremos a un *Subkausalität* (subcausalidad), sino que, en el sentido indicado, llegaremos a una *Überkausalität* (supercausalidad)»³.

No obstante en su artículo de 1923, titulado “¿Ofrece la teoría de campos posibilidades para la solución del problema cuántico?”, expone Einstein tres requisitos, que son enumerados por Pais de esta forma:

“1) covariancia general, 2) las ecuaciones deseadas debieran estar de acuerdo por lo menos con las teorías gravitatoria y de Maxwell, y 3) el deseado sistema de ecuaciones que sobredetermina los campos debiera tener soluciones estáticas, de simetría esférica, que describan el electrón y el fotón. Si se puede lograr esta sobredeterminación, entonces «podemos esperar que estas ecuaciones co-determinen el comportamiento mecánico de los puntos singulares (electrones) de modo tal que las condiciones iniciales, del campo y de los puntos singulares queden también sujetas a las condiciones restrictivas». Continuó presentando un ejemplo tentativo y concluyó: «Para mí, el punto principal de esta comunicación es la idea de sobredeterminación»⁴.

Las tentativas concretas comenzaron entre 1923 y 1924, cuando Einstein estaba trabajando en una teoría que conciliara los cuantos con el campo de Maxwell⁵ y en 1925 elabora la “teoría unitaria mixta”, que consiste en lo siguiente: «Independientemente uno del otro, introducimos una relación afín ($\Gamma^{\alpha}_{\mu\nu}$) y un tensor ($g_{\mu\nu}$ resp. $g^{\mu\nu}$ $\mathbf{g}^{\mu\nu}$) y exigimos que se verifique, para una variación cualquiera (independiente) de las $\mathbf{g}^{\mu\nu}$ y de las $\Gamma^{\alpha}_{\mu\nu}$, el principio del cálculo de variaciones $\partial \left(\int g^{\mu\nu} R_{\mu\nu} d\tau \right) = 0$, $R_{\mu\nu} =$

³ EINSTEIN, A., *Forschungen und Fortschritte*, n° 5, 248 (1929). Citado por Pais en: El Señor es sutil... La ciencia y la vida de Albert Einstein, p. 465.

⁴ PAIS, A., El Señor es sutil... La ciencia y la vida de Albert Einstein, p. 465. Las citas de Einstein que incluye este párrafo pertenecen al mencionado artículo de 1923, que apareció en: *PAW*, 1923, p. 359.

⁵ Cf. EINSTEIN, A./ BESSO, M., Correspondencia con Michele Besso, carta 73.1 de Einstein, fechada el 24 de mayo de 1924, p. 218, y carta 74 de Einstein, fechada el 5 de junio de 1925, p. 220.

tensor de Riemann $\left(-\frac{\partial \Gamma_{\mu\nu}^{\alpha}}{\partial x_{\alpha}} + \Gamma_{\mu\nu}^{\alpha} \cdot \Gamma_{\nu\alpha}^{\beta} \right)$. Si se estipula que las g^{uv} y las

$\Gamma_{\mu\nu}^{\alpha}$ son simétricas, se obtiene la antigua ley de la gravitación para el espacio vacío. Si se descarta la hipótesis de la simetría, se obtiene, en primera aproximación, las leyes de la gravitación y las leyes del campo de Maxwell para el espacio vacío, en las cuales la parte antisimétrica de las g^{uv} representa el campo electromagnético. He aquí pues una espléndida posibilidad que podría corresponder a la realidad. La cuestión es saber si esta teoría del campo es compatible o no con la existencia de los átomos y los cuantos. No dudo de su exactitud para el mundo macroscópico. ¡Si por lo menos el cálculo en el caso de los problemas particulares fuera menos arduo! El lugar está lleno de fantasmas, pero sólo de momento»⁶.

Más abajo, Pierre Speziali, cuando comenta esta carta de Einstein a Besso, apunta que aquél obtuvo esta teoría unitaria mixta a partir de las variaciones independientes de una métrica y de una conexión asimétricas y dice así: «En 1925, para llevar a buen fin esta teoría, Einstein está tentado de reestablecer el carácter simétrico de la conexión. La teoría se distingue entonces de la relatividad general únicamente por la presencia de un cuadvectores arbitrario susceptible de representar el potencial electromagnético. También puede presentarse como una generalización de las tentativas de Weyl y de Eddington».

Esta teoría no tendrá el éxito que Einstein esperaba de ella, pero le servirá de puente hacia su última teoría unitaria de 1945: «Hace algunos años que he encontrado por fin la generalización natural de las ecuaciones de campo de la gravitación, y cuento con que se convertirá en una teoría utilizable del campo unificado. Pero es tan difícil calcular las integrales que figuran en ella, que no poseo ningún argumento pertinente a favor ni en contra. Los augures son unánimes en declarar que las matemáticas actuales no permiten calcularlas. Pero yo no he bajado la bandera y estoy día y noche preocupado con esto»⁷.

Aunque, antes de llegar a ésta, hizo otro intento en 1928, se trata de la “Teoría unitaria de campos”⁸, de la cual destaca la ausencia de h en las ecuaciones, pues, como dije más arriba, toda nueva teoría que pretenda

⁶ *Ibid*, carta 76 de Einstein, fechada el 28 de julio de 1925, pp. 223-224.

⁷ *Ibid*, carta 157 de Einstein, fechada el 24 de julio de 1949, p. 362. Este trabajo al que se refiere Einstein puede encontrarse en “Generalized theory of gravitation”, *Reviews of Modern Physics*, 20, (1948), pp. 35-39.

⁸ “Einheitliche Feldtheorie”, *Sitzungsberichte der Preuss. Ak. der Wiss*, 1929, p. 27.

sustituir a la mecánica cuántica ha de eliminar, necesariamente, la noción de “cuanto” de todo el aparato matemático, a pesar del “aire antiguo”, como dice Einstein, que tal ausencia conlleva:

“Pues en estas ecuaciones no aparece ninguna h de Planck. Pero cuando verdaderamente se hayan alcanzado los límites de las posibilidades de la chaladura estadística, se volverá de repente a la representación espacio-temporal, y estas ecuaciones constituirán entonces un punto de partida. En efecto, he encontrado una geometría que no tiene únicamente una métrica de Riemann, sino también un paralelismo absoluto, que considerábamos intuitivamente hasta aquí como una característica de la geometría euclidiana, y las ecuaciones de campo más sencillas de una tal multiplicidad conducen a las leyes de la electricidad y de la gravitación. Incluso las ecuaciones $R_{ik}=0$ deben ser relegadas al desván, pese a los éxitos obtenidos”⁹.

A continuación Pierre Speziali aclara que esta teoría «admite un paralelismo absoluto, es decir, un paralelismo de distancia finita. El espacio-tiempo comporta entonces una torsión (la conexión afín no es simétrica), pero está desprovisto de cualquier curvatura. Ese es el motivo por el que las ecuaciones $R_{ik} = 0$ deben ser «relegadas al granero». Las leyes de la gravitación y del electromagnetismo aparecen como las condiciones de estructuras impuestas a una única torsión (descrita por los 24 coeficientes antisimétricos $2\Gamma_{\mu\nu}^{\rho} = \Gamma_{\mu\nu}^{\rho} - \Gamma_{\nu\mu}^{\rho}$)».

Cuando afirmo que la física cuántica es una teoría tan *acabada* que ninguna teoría futura podría llegar a ser una ampliación revisada del esquema matemático de aquella, sólo me refiero a que la discontinuidad cuántica introduce un rasgo esencial en torno al cual se elabora todo el aparato matemático de esta física y al cual se deben todas sus características epistemológicas, propias del marco teórico cuántico: indeterminismo, probabilidad, inseparabilidad sujeto-objeto, etc.; Einstein sabía muy bien que si queremos construir una teoría determinista no se puede construir a partir de la noción de “cuanto”, sino a partir de un modelo de continuidad basado en la noción de “campo”.

Por esta razón, ha de ser una teoría, completamente, diferente a la física cuántica y no por los argumentos que emplea Born en relación con los axiomas del teorema de completud de von Neumann:

⁹ EINSTEIN, A./BESSO, M., Correspondencia con Michele Besso, carta 93 de Einstein, fechada el 5 de enero de 1929, p. 247.

“El resultado es que el formalismo de la mecánica cuántica está especialmente determinado por esos axiomas; en particular, no es posible introducir parámetros ocultos con cuya ayuda transformar la descripción indeterminista en determinista. Por consiguiente, si una teoría futura fuese determinista no podría ser una modificación de la presente, sino que debería ser esencialmente distinta. Dejo a los determinista que se preocupen de estudiar cómo podría ser esto posible sin sacrificar todo el tesoro de resultados bien establecidos”¹⁰.

Después de todos estos intentos, en el año 1937, escribe a su amigo Besso reconociendo que el camino que había seguido hasta ese momento de «una adaptación relativista directa de las ecuaciones de Maxwell»¹¹ estaba equivocado; por ejemplo, uno de estos intentos fallidos fue la teoría que elaboró junto a Rosen en el año 1936: «... hemos descubierto que la combinación más simple de ecuaciones de campo de la gravedad y electricidad mencionada anteriormente produce soluciones centralmente simétricas, libres de cualquier singularidad (las conocidas soluciones centralmente simétricas de Schwarzschild para el campo gravitatorio puro y las de Reissner para el campo eléctrico con consideración de su acción gravitatoria). (...) Por este camino parece establecer, para la materia y sus interacciones, una teoría de campo pura, libre de hipótesis adicionales, una teoría que al ser sometida a verificación empírica no nos cree más dificultades que las puramente matemáticas (que, desde luego, son muy serias)». Y, en unas páginas más allá, explica: «Por consiguiente, la solución de Schwarzschild se convierte en una solución regular mediante la representación del espacio físico como compuesto por dos “láminas” idénticas en contacto en toda la hipersuperficie $\rho = 0$ (es decir, $r = 2m$), sobre la cual el determinante g se anula. Denominaremos “puente” a esa conexión entre las dos láminas (idénticas). De modo que la existencia de ese puente entre las dos láminas en el ámbito finito corresponde a la existencia de una partícula material neutra que se describe libre de singularidades. La solución al problema del movimiento de las partículas neutras evidentemente equivale al descubrimiento de soluciones de las ecuaciones gravitatorias (escritas libres de denominadores), en cuanto

¹⁰ BORN, M., Natural Philosophy of Cause and Chance, Dover, New York, 1964. (Citado por Selleri en: El debate de la teoría cuántica, p. 58).

¹¹ Cf. EINSTEIN, A./BESSO, M., Correspondencia con Michele Besso, carta 124 de Einstein, fechada el 9 de junio de 1937, p. 298.

contienen varios puentes. De una manera análoga es posible demostrar que las ecuaciones combinadas de la gravedad y la electricidad (con la elección adecuada del signo del miembro eléctrico en las ecuaciones gravitatorias) producen una representación-puente libre de singularidades del corpúsculo eléctrico. La más simple de las soluciones de este tipo es la que sirve para una partícula eléctrica sin masa pesante»¹².

Debido a todos estos logros, Einstein concluye que «éste es en realidad el primer intento de elaboración consistente de una teoría de campo, que tiene la posibilidad de explicar las propiedades de la materia. A favor de este intento se puede agregar que se ha basado en las ecuaciones de campo relativistas más simples conocidas».

Pero un año después vuelve a escribir a su amigo que había iniciado una nueva vía utilizando las ideas de Kaluza sobre el campo eléctrico:

“Desde el punto de vista científico, atravieso un periodo muy interesante. Como tú sabes, nunca he creído en fundamentos esencialmente estadísticos de la física, pese a los éxitos de la teoría cuántica. He ahí, entonces, que este año encuentro, tras veinte años de investigación en vano, una teoría prometedora del campo, que es la continuación natural de la teoría relativista de la gravitación. Sigue la línea de las ideas de Kaluza sobre el campo eléctrico”¹³.

El objetivo de la teoría de Kaluza era conectar el campo de la teoría electromagnética de Maxwell con la teoría de campo gravitatorio de la relatividad de Einstein; sin embargo, dos años antes de que Einstein volviera sobre esta teoría, sus impresiones fueron negativas y rechazó tal teoría por la siguiente razón: «*El deseo de obtener, en los fundamentos de la teoría, la mayor unidad posible ha desembocado en diversos intentos de incluir el campo gravitatorio y el campo electromagnético en un todo formal unificado. Aquí hemos de mencionar en particular la teoría de las cinco dimensiones de Kaluza y Klein. Después de haber estudiado esta posibilidad con especial cuidado, considero que es preferible aceptar la carencia de uniformidad interna que presenta la teoría original, porque no creo que la totalidad de las hipótesis de la teoría de cinco dimensiones contenga menos elementos arbitrarios que la teoría original. La misma*

¹² EINSTEIN, A., “Física y realidad” (1936), Mis ideas y opiniones, p. 281 y pp. 288-290.

¹³ EINSTEIN, A./BESSO, M., Correspondencia con Michele Besso, carta 126.1 de Einstein, fechada el 8 de agosto de 1938, p. 304.

afirmación se podría hacer respecto a la versión proyectiva de la teoría, que ha sido elaborada con gran cuidado en especial por von Dantzig y por Pauli»¹⁴.

No obstante, dado que esta tentativa también fracasó¹⁵, Einstein se propuso a continuación sustituir la métrica riemanniana por una *métrica hermitica* (de la forma $g_{ik} dx^i dx^k$). Aquello que tienen en común todos estos proyectos teóricos es, en palabras de Einstein, «*el que me esfuerzo en encontrar, como ecuación del campo total, algo que sea, de una manera y otra, análogo en cuanto a la forma a las ecuaciones de la gravitación en el vacío, pero que se aplique al campo total*». Einstein siguió elaborando teorías unitarias, basadas en la generalización de las ecuaciones de la gravitación en el vacío¹⁶, hasta 1953 cuando concluyó la teoría que había iniciado en 1945¹⁷, de cuyo trabajo¹⁸ él mismo apunta:

“En cuanto a saber si hay algo de *exacto* en esta teoría, no sé nada de ello, pues no he podido encontrar ninguna solución determinante sin singularidad. Es terriblemente difícil, pues la resolución de las ecuaciones lineales (1) respecto de las Γ es imposible.

Es una desgracia que lo que es sencillo desde el punto de vista de la lógica, sea tan complicado desde el punto de vista del cálculo”¹⁹.

Cuatro años después Einstein hacía la misma observación respecto a la teoría de la relatividad generalizada: «*No hay ninguna duda sobre el buen sentido de esta teoría. Sin embargo, nada puede confirmarla todavía. Esto proviene del hecho de que la teoría debe limitarse a las soluciones que están exentas de singularidades en todas partes, para que estén suficientemente determinadas. Desentrañar algo respecto a la existencia o inexistencia de tales soluciones, sobrepasa ciertamente las capacidades de*

¹⁴ EINSTEIN, A., “Física y realidad” (1936), Mis ideas y opiniones, p. 281.

¹⁵ Cf. EINSTEIN, A./BESSO, M., Correspondencia con Michele Besso, carta 141 de Einstein, fechada en agosto de 1942, p. 335-337.

¹⁶ Cf. *Ibid*, carta 161 de Einstein, fechada el 16 de agosto de 1949, pp. 366-368.

¹⁷ Tal teoría se publicó, incluyéndose como el Apéndice II, en: El significado de la relatividad, a partir de la cuarta edición, con el título “Teoría relativista del campo no simétrico”.

¹⁸ EINSTEIN, A./INFELD, L., «Motion of particles in general relativity theory», *Canadian Jour. of Mathematics*, 3 (1949), pp. 209-241.

¹⁹ EINSTEIN, A./BESSO, M., Correspondencia con Michele Besso, carta 161 de Einstein, fechada el 16 de agosto de 1949, p. 368.

las matemáticas actuales. Ya no estaremos aquí para asistir al desenlace»²⁰.

En 1952 Einstein escribió de nuevo a Besso comunicándole algunos cambios en su teoría:

“Debo decirte además que, hace aproximadamente quince días, he hecho progresos decisivos en la generalización de la teoría de la relatividad general.

En efecto, las ecuaciones del campo para un campo no simétrico no estaban hasta ahora determinadas de una manera teórica unívoca. Esta dificultad se ha salvado ahora gracias a una extensión de las propiedades de grupo del campo.

Aparte de la invariancia de la transformación, la invariancia debe también subsistir para la transformación del «campo de desplazamiento» Γ^l_{ik} :

$$\Gamma^{l*}_{ik} = \Gamma^l_{ik} + \delta^l_i \cdot \lambda_k$$

donde λ_k es un vector cualquiera.

En este grupo dilatado, las antiguas ecuaciones de la gravitación ya no son covariantes, aunque cada una de sus soluciones es solución del nuevo sistema. La teoría general del campo se hace entonces tan convincente como la antigua teoría de la gravitación. La comprobación física de esta teoría todavía no es visible en el horizonte, y la creencia actual en el carácter estadístico de una ley hace a los físicos refractarios respecto a ella”²¹.

No obstante, en 1954 Einstein vuelve a expresar sus dudas: «Pero, en la teoría generalizada del campo, las cosas son tan complicadas que ni yo mismo veo claramente si debo creer o no que es verdadera. Muchos más se romperán la cabeza en ella cuando yo ya no esté en este mundo»²². Y de una manera más explícita: «La razón por la que no sé si esta teoría corresponde a alguna realidad física se encuentra únicamente en el hecho de que no se alcanza a pronunciarse ni sobre la existencia, ni sobre la constitución de soluciones, desprovistas de singularidades en todas partes, de tales sistemas de ecuaciones no lineales»²³.

A pesar de todos estos intentos de Einstein y de tantos esfuerzos, al final tuvo que reconocer que la teoría del campo único no había alcanzado

²⁰ *Ibid*, carta 200 de Einstein, fechada el 22 de septiembre de 1953, p. 433.

²¹ *Ibid*, carta 182 de Einstein, fechada el 6 de marzo de 1952, pp. 404-405.

²² *Ibid*, carta 206 de Einstein, fechada el 14 de mayo de 1954, p. 441.

²³ *Ibid*, carta 210 de Einstein, fechada el 10 de agosto de 1954, p. 448.

plenamente el objetivo de aportar una «teoría verdaderamente racional de los cuantos de luz y de las partículas materiales» y que la única teoría, actualmente disponible, capaz de explicar los fenómenos atómicos era la mecánica cuántica y su tratamiento estadístico, en relación con lo cual afirma lo siguiente:

“Evidentemente, muchos consideran muy incómoda esta situación. Pero es, hasta este momento, la única manera concordante con la experiencia de calcular los estados cuánticos y sus probabilidades de transición. Estoy completamente convencido de que la verdad se sitúa lejos de la enseñanza actual. Quién sabe si mi teoría relativista general del campo no simétrico no es la buena. Las dificultades matemáticas para la contrastación con la experiencia son por el momento todavía insuperables. Sea como fuere, estamos tan alejados de una teoría verdaderamente racional (de la dualidad de los cuantos de luz y de partículas) como lo estábamos hace cincuenta años”²⁴.

Pero Einstein siguió luchando contra la mecánica cuántica y más adelante insiste de nuevo: «Estamos todavía lejos de poseer una teoría racional de la luz y de la materia que esté de acuerdo con los hechos. Creo que sólo una especulación audaz es capaz de hacernos progresar, y no una acumulación de experiencias. Material empírico incomprensible tenemos más del que nos hace falta»²⁵.

Como se ha podido leer en el capítulo quinto, Einstein pasó sus últimos cincuenta años, desde 1905, preguntándose sobre la realidad de los cuantos de luz y buscando una teoría, basada en el principio de relatividad y a partir de una generalización las ecuaciones del campo gravitatorio, que explicara los estados discretos de los constituyentes de la materia a partir del modelo de continuidad. Sin embargo, al final de su vida tuvo dudas acerca de la realización de tal programa.

Treinta y cuatro años después escribe a Schrödinger y en esta carta puede verse que aún cree que se pueda construir una teoría que sustituya a los cuantos sobre la base del continuo²⁶; pero, cuatro años después en la

²⁴ *Ibid*, carta 190 de Einstein, fechada el 10 de septiembre de 1952, p. 417.

²⁵ *Ibid*, carta 192 de Einstein, fechada el 8 de octubre de 1952, p. 420.

²⁶ “Tu soulignes tout à fait justement que la description complète ne peut pas être constituée à partir du concept d’accélération, pas plus -me semble-t-il- qu’à partir du concept de particule. De notre outillage, il ne reste que le concept de champ; mais seul le diable sait s’il va résister. Je pense que cela vaut la peine de s’en tenir fermement au concept de champ, c’est-à-dire au continuum, tant que personne n’y oppose de raisons réellement solides”.

última carta que escribe a su amigo Besso declara: «(...) la teoría está suficiente y unívocamente determinada por las exigencias de la relatividad. Admito, sin embargo, como perfectamente posible, que la física pueda no estar fundada sobre el concepto de campo, es decir, sobre elementos continuos. Pero entonces no quedaría de mi castillo en el aire -incluyendo la teoría de la gravitación- y tampoco de la física actual, prácticamente nada»²⁷.

También Pais fue testigo de estas dudas de Einstein, quien, «al comienzo de los años 1950, me dijo una vez que no estaba seguro de que la geometría diferencial fuera marco adecuado para ulterior progreso, pero que, si lo era, entonces él estaba en el camino correcto»²⁸.

Además, este mismo autor recoge otra cita de Einstein: «Parece dudoso que una teoría de campo (clásica) pueda explicar la estructura atómica de la materia y la radiación, al mismo tiempo que los fenómenos cuánticos. La mayor parte de los físicos contestarán con un convencido “no”, porque creen que el problema cuántico ha sido resuelto, en principio, por otros medios. Sea ello como sea, nos queda la confortante enseñanza de Lessing: la aspiración a la verdad es más preciosa que su posesión definitiva»²⁹.

En definitiva el problema de esta teoría es que fue buscada por Einstein a partir de la geometría diferencial, desde funciones continuas con ecuaciones diferenciales parciales³⁰. La razón de este proceder es que está persiguiendo «una representación exhaustiva de la realidad física sobre la base del continuo». Pero, además, la gravitación sólo se representa con una geometría no euclídea. Por ello, llegó a afirmar lo siguiente:

“La significación objetiva del espacio y del tiempo se encuentra, en primer lugar, en el hecho de que el *continuum* tetradimensional es hiperbólico; de modo que, a partir de cualquier punto, existen líneas «temporales» y «espaciales», es decir, líneas para las cuales $ds^2 > 0$, y otras para las cuales es $ds^2 < 0$. Las coordenadas x_i no

EINSTEIN, A., *Quanta. Mécanique statistique et physique quantique*, carta a Schrödinger, fechada el 22 de diciembre de 1950, p. 251.

²⁷ EINSTEIN, A./BESSO, M., *Correspondencia con Michele Besso*, carta 210 de Einstein, fechada el 10 de agosto de 1954, p. 448.

²⁸ PAIS, A., *El Señor es sutil... La ciencia y la vida de Albert Einstein*, p. 468.

²⁹ Esta cita, aparece en: SEELIG, G. (ed.), *Helle Zeit, dunkle Zeit*, Europa Verlag, Zürich, 1956.

³⁰ Cf. EINSTEIN, A., *Notas Autobiográficas*, pp. 81-87.

poseen *en sí* carácter espacial o temporal. Se puede, a fin de conservar nuestros hábitos de pensamiento, dar la preferencia a los sistemas para los cuales se tiene en todas partes $g_{44} dx_4^2 > 0$, $g_{11} dx_1^2 + 2g_{12} dx_1 dx_2 \dots g_{33} dx_3^2 < 0$. Sin embargo, no hay que atribuir ninguna justificación objetiva a tal elección. El carácter «espacial» o «temporal» es pues real. Pero no se puede decir que, «por naturaleza», una coordenada sea temporal y las otras sean espaciales»³¹.

De manera que, la fórmula, a la que se refiere Einstein en su aserto, sólo implica que con ella contemplamos un fragmento de la realidad del espacio, un $ds^2 > 0$, que es mayor y, por tanto, contiene los intervalos (invariantes) de $ds^2 < 0$, con lo cual podemos ignorar su carácter temporal.

Para terminar el recorrido de este apéndice por la teoría del campo único, citaré íntegramente al protagonista de esta batalla, que jamás abandonó pero que nunca venció:

“Debe admitirse que la nueva concepción teórica se debió no a la fantasía de unos científicos, sino al peso de los hechos empíricos. Todos los esfuerzos por representar las características ondulatorias y de partícula observadas en la luz y la materia, recurriendo en forma directa al modelo espacio-tiempo, hasta el presente han desembocado en el fracaso. Y Heisenberg ha demostrado de modo convincente, desde un punto de vista empírico, que cualquier decisión en cuanto a una estructura de la naturaleza rigurosamente determinista está descartada de una manera definitiva, en razón de la estructura atómica de nuestro aparato experimental. Por ello es probable que esté descartado que algún conocimiento futuro pueda obligar a la física a abandonar su fundamento actual teórico de carácter estadístico, en favor de otro determinista, que tratara con la realidad física en forma directa. Desde el punto de vista lógico, el problema parece ofrecer dos posibilidades, frente a las cuales, en principio, estamos en condiciones de elegir. En última instancia, la elección se hará de acuerdo con el tipo de descripción que produzca la formulación más simple de los fundamentos, hablando en términos de lógica. De momento, carecemos de toda teoría determinista que describa directamente los propios sucesos y esté en consonancia con los hechos.

³¹ EINSTEIN, A./ BESSO, M., Correspondencia con Michele Besso, p. 134, carta 27 de Einstein, fechada el 31 de octubre de 1916.

Tal y como están las cosas, debemos admitir que no poseemos ninguna base teórica para la física, ninguna base a la que se pueda considerar el fundamento lógico de esta disciplina”.³²

Y termina el párrafo sentenciando lo siguiente: *«La teoría de campos, hasta el momento presente, ha fracasado en la esfera molecular. Comúnmente se acepta que el único principio que podría servir de base a la teoría cuántica sería el que representara una traslación de la teoría de campos a un esquema de la estadística cuántica. Nadie está hoy en condiciones de aventurarse a asegurar si tal cosa podrá producirse de una manera satisfactoria».*

³² EINSTEIN, A., “Los fundamentos de la física teórica” (1940), Mis ideas y opiniones, pp. 301-302.

APÉNDICE II:

«APUNTES ACERCA DE LA FUNDAMENTACIÓN INTUICIONISTA Y FORMALISTA DE LAS MATEMÁTICAS»

En el capítulo VII dije que Brouwer busca el fundamento de la matemática en el entendimiento humano, pues en él se da, de manera íntima, esa “*intuición básica*” o intuición en su forma pura, que es el movimiento del tiempo, la cual genera y construye el quehacer matemático.

El estudio de Cañón Loyes revela que, en una de sus obras de juventud, *Vida, Arte y Misticismo*, publicada en 1905, Brouwer define la vida como un progresivo salir hacia afuera desde el interior del yo. Durante este proceso se dan tres estadios jerarquizados de conciencia: la primera fase es la más íntima y es donde aparece la matemática, producida por la intuición temporal, la más pura, sin relaciones causales; la ciencia se da en la segunda fase, que es la causal, cuando los sentidos nos imponen la presencia de regularidades; por último, la fase social, donde surge el lenguaje y con él la lógica, movido por la necesidad de comunicarse cuando el hombre mantiene relaciones interpersonales con los otros.

Más tarde, en su lección inaugural del año 1907, aunque Brouwer siga pensando que la Matemática está fuera del ámbito de las ciencias y que es algo que está más próximo al arte y a la mística, distinguirá entre esta matemática pura y otra de segundo orden, a la que llamará en 1922 “*Metamatemática*”. La matemática de segundo orden sí es una ciencia, en tanto que se establece a partir de relaciones causales y podemos aplicarla a la experiencia. En palabras de Brouwer:

“Las matemáticas sólo llegan a ser ciencia, es decir, un conjunto de secuencias causales repetibles en el tiempo, como matemáticas de segundo orden, que es la consideración matemática de las matemáticas o del lenguaje de las matemáticas; solamente aquí encontramos relaciones causales en las cuales los sistemas matemáticos o palabras y símbolos se siguen unos de otros; pero como en el caso de la lógica teórica, esto es una aplicación de las matemáticas, una ciencia con base en la experiencia”¹.

¹ BROUWER, L.E.J: *Over de grondslagen der wiskunde*, Mass and van Suchtelen, Amsterdam, 1907, p. 98.

Por esta razón, Brouwer discrepa de Poincaré respecto a la existencia de objetos matemáticos, el cual, coincidiendo con Hilbert, ha de presuponer la existencia de un mundo de estos objetos, independiente del pensamiento humano y regido por las leyes de la lógica clásica, de tal modo que la consistencia pueda ser un criterio suficiente de verdad y de existencia para los objetos matemáticos. Así lo declara él mismo en una carta dirigida a Frege:

“Si los axiomas dados arbitrariamente no se contradicen unos a otros en todas sus consecuencias, entonces, ellos son verdad y las cosas definidas por los axiomas existen. Este es para mí el criterio de verdad y de existencia”².

No obstante, Brouwer no necesita nada de esto porque, dado que él defiende que dichos objetos son construcciones, la verdad de un teorema matemático sólo expresa la existencia de una construcción matemática; ésta es la esencia del “constructivismo”:

“Él no necesita apelar a elementos preexistentes o a leyes de la lógica, le basta distinguir como niveles distintos y sucesivos la Matemática, el lenguaje y la lógica, y reconocer el a priori de la intuición temporal. Los objetos matemáticos son construcciones del intelecto a partir de la intuición básica y en cuanto que son contruidos, existen en la mente, su expresión mediante el lenguaje da lugar a una proposición verdadera. Tampoco necesita consiguientemente la noción de verdad como conformidad del pensamiento con el objeto. La verdad procede de la construcción realizada en la mente humana”³.

Ahora bien, ¿cómo se realiza esta construcción? Para Brouwer el lenguaje, tanto el simbólico o formal como el natural, es simplemente un medio de comunicación social, que, además, es deficiente, por lo tanto, rechaza a éste como elemento desde el que construir la Matemática, aunque lo admite como medio para comunicar tales construcciones, realizando copias de éstas y de sus correspondientes razonamientos que nos transmitimos los unos a los otros, y como ayuda para recordarlas.

² *Carta de Hilbert a Frege* del 29-12-1899. (Citado en: CAÑÓN LOYES, C., La Matemática. Creación y descubrimiento. Universidad Pontificia Comillas (UPCO), Madrid, 1993, p. 252).

³ CAÑÓN LOYES, C., La Matemática. Creación y descubrimiento. Universidad Pontificia Comillas (UPCO), Madrid, 1993, p. 253.

El radicalismo de Brouwer está en afirmar que esta función del lenguaje, sólo como medio de comunicación no de construcción matemática, la puede llevar a cabo tanto el lenguaje simbólico como el lenguaje ordinario e incluso es preferible utilizar el segundo antes que el primero porque éste pretende ser un lenguaje acabado, cerrado en sí mismo, de modo que los signos formales destruyen la arbitrariedad de la asociación, entre el signo y aquello que significa, que todo lenguaje posee ya que existe una gran diversidad de lenguas.

Si el lenguaje, incluso el formal, es simplemente un medio de comunicación, entonces la lógica no puede ser una fuente de conocimiento matemático. Por tanto, se opone tanto a los logicistas como a los formalistas en la pretensión de todos ellos de fundamentar la matemática pura en la lógica⁴. Cuando se descubrió que la *teoría de conjuntos* implicaba paradojas, tal fundamentación lógica de la matemática se tambaleó y surgieron las dos actitudes generales distintas entre los matemáticos, que expuse en el capítulo séptimo:

“(…) mientras formalistas y logicistas prepararon estrategias para apuntalar el edificio, el intuicionismo apareció como un intento de construir el edificio sobre cimientos nuevos y distintos. En este edificio, la lógica aparecerá como un subproducto del quehacer matemático, que en algún caso puede revertir en la construcción de ciertas partes del edificio, como es el caso de los dominios de conjuntos finitos. En *Grundslagen* (1927), Brouwer distingue los tres niveles siguientes: 1-Deducción lógica intuitiva. 2-Lógica teórica. 3-Logística. El primero corresponde a la clase especial de razonamiento matemático que permanece cuando uno, al considerar los sistemas matemáticos, se restringe exclusivamente a la relación del «todo-parte». La lógica teórica es el estudio y

⁴ “Los esfuerzos y los éxitos alcanzados en la aplicación del lenguaje matemático a la lógica -realizados fundamentalmente por De Morgan en su libro “Formal Logic” (1847) y por Boole en “Mathematical Analysis of Logic” (1849)- llevaron a finales de siglo a establecer la pretensión de encontrar los fundamentos últimos de la matemática en la pura lógica. Peirce, Dedekind y Cantor fueron los primeros en basar su concepto de número en un análisis lógico y de este modo, en colocar los fundamentos de la Matemática dentro del dominio de la lógica. Fue Frege, sin embargo, quien en su *Begriffsschrift* (1879) dio un paso más inventando un sistema de lógica simbólica que tenía la pretensión de ser de una utilidad análoga a lo que es el microscopio al ojo. Frege se propuso reducir la aritmética a una parte de la lógica; Peano, que se reconocía a sí mismo en la misma línea que Frege, aunque independiente de ella, adoptó una actitud menos radical que Frege. Intentó probar que la aritmética y el álgebra pueden ser construidas sobre la base de unos pocos conceptos primitivos y unas proposiciones tomadas como axiomas consistentes entre sí. Hilbert haría uso de estos resultados”. *Ibid*, pp. 255-256.

análisis del lenguaje del razonamiento. Es la lógica aristotélica. Pero mientras que ésta nunca reclamó ser el fundamento de la matemática, la lógica establece los principios lógicos como reglas de la matemática. Es esta pretensión la que la hace objeto de crítica especial por parte de Brouwer”⁵.

Pero, Brouwer sólo criticó tal cosa y nunca despreció la lógica en tanto que *«ciencia autónoma cuyo objeto era precisamente el lenguaje matemático y cuyo método era el de las ciencias: el descubrimiento de relaciones causales en la matemática a través de su formulación lingüística. (...) La principal preocupación de Brouwer, eso sí, no es la lógica ni los principios lógicos. Su preocupación por la lógica es en tanto que existe una relación entre Matemáticas y Lógica y trata de expresar su propio punto de vista sobre esta relación. Punto de vista que podemos sintetizarlo como sigue: En primer lugar, una prioridad absoluta de la matemática respecto de la lógica. Esta prioridad está basada, como ya hemos dicho, en su concepción de la lógica como un análisis, la descripción verbal de la matemática. Es pues la matemática independiente de la lógica y condición de posibilidad para ella. En segundo lugar, la afirmación de que la lógica no es para Brouwer una fuente de conocimiento matemático. Esta afirmación debería matizarse con la cuestión ya mencionada de si existe una cierta correspondencia entre el trabajo en el edificio de la lógica y la construcción matemática. Cuestión a la que él respondió con un sí para los dominios finitos y con un no taxativo para los infinitos a causa del principio de tercio excluso. Por último, una tesis interesante. Los principios calificados de lógicos sólo son aplicables retrospectivamente a los sistemas matemáticos de los que se han derivado. Se originaron de la actividad matemática con conjuntos finitos y se extrapolaron luego a conjuntos infinitos cualesquiera. Ahí radica el error y esa aplicación se ha convertido en fuente de paradoja»*⁶.

Aún más, Brouwer afirma que las leyes lógicas sólo tienen una aplicación válida al lenguaje de la matemática y que no necesitan ser válidas para otros lenguajes; no obstante, también afirma que la contradicción no es un problema matemático, sino lógico, pues en matemáticas aquella sólo significa que la pretendida construcción no es posible:

⁵ *Ibid*, p. 256.

⁶ *Ibid*, pp. 257-258.

“(…) la contradicción es una característica del lenguaje, pero nunca una propiedad de las construcciones matemáticas. Si dos de éstas no «encajan» quiere decir que la construcción a la que se orientaban no puede llevarse a cabo, pero no aparece en este proceso el concepto de contradicción como parte de la actividad matemática”⁷.

Tal consideración avala su postura de rechazo hacia la consistencia, ausencia de contradicción, como criterio de verdad y de existencia: si la contradicción no es una propiedad de las construcciones matemáticas, «*la ausencia de contradicción en una demostración, no es garantía suficiente para la validez de un argumento matemático. Es decir, ni la aparición de contradicción garantiza la existencia de un objeto, que supuestamente se había negado, ni la ausencia de contradicción justifica por sí misma la aceptabilidad del razonamiento matemático. La legitimación no viene dada por la lógica sino por el proceso constructivo*»⁸.

Por lo tanto, las demostraciones indirectas de existencia quedarán invalidadas porque pretende probar la existencia siempre y cuando su negación nos lleve a una contradicción. Además, esta contradicción, o absurdo, en la conclusión de un razonamiento supone la *validez universal* del principio aristotélico de tercio excluso (*PTE*), el cual es rechazado por Brouwer, en su uso acrítico y dogmático, en base al siguiente argumento:

“La lógica clásica procede de la extracción de las regularidades de un lenguaje que trata de colecciones finitas de cosas. Con el tiempo, los matemáticos lo extrapolaron a dominios infinitos. Por eso, es absolutamente legítimo aplicar el PTE a dominios finitos, pero no lo es extrapolar su uso a dominios infinitos. La justificación de su postura la encuentra en la existencia de problemas matemáticos que no han sido resueltos y que la aplicación del PTE no parece que pueda conducir a buen fin. Sólo una aproximación constructiva, puede hacer avanzar hacia la solución. Cita por ejemplo problemas del tipo: «*¿Hay en la expansión decimal de π , un número que aparezca con mayor frecuencia que otros? ¿Hay en la expansión decimal de π infinitos números pares seguidos por los mismos números dígitos?*» O el teorema de Fermat: «*Dado $n > 2$, ¿existen tres enteros positivos: x , y , z ; tales que: $x^n + y^n = z^n$?*»⁹.

⁷ *Ibid*, p. 258.

⁸ *Ibid*, p. 260.

⁹ *Ibid*, p. 259.

Por su parte, Hilbert insistió en mantener, a pesar de la oposición de Frege¹⁰, el mundo intermedio y específico de entes matemáticos como objetos ideales, cuyas leyes están gobernadas por la consistencia interna de los axiomas matemáticos, que no tienen por qué ajustarse a nuestras formas de representarnos el mundo ni a la experiencia.

En franca oposición a esta tesis de Hilbert está la postura de Frege, para el cual axioma y verdad son términos inseparables, de modo que, para él, el uso que hace Hilbert del término “axioma” es ilícito y los llamará “pseudoaxiomas”, en la medida en que éstos son arbitrariamente introducidos en la teoría y sólo se decide su verdad a través del criterio de consistencia interna: «*dado que Hilbert sustituye verdad por validez en su reino de entidades ideales, la no validez, debe pues equivaler a falsedad, pero a Frege oír que falso se predica de un axioma le suena a contradicción in terminis, porque verdad y axioma son inseparables*»¹¹, de tal forma que no podemos crear nuevos axiomas, ya que éstos son siempre verdad y provienen de una fuente extralógica:

“Llamo axiomas a proposiciones que son verdad, pero, que no son demostradas, puesto que nuestro conocimiento de ellas brota de una fuente muy diferente de la fuente lógica, una fuente que pudiera ser llamada de intuición espacial”¹².

No obstante, el término que prevaleció fue el de Hilbert, ya que éste se ajustará a la “teoría de modelos” de la lógica matemática: «*la metamatemática hilbertiana introduce una separación entre símbolo y objeto significado*», dice Cañón Loyes; pero una separación que también

¹⁰ Cañón Loyes afirma que esta oposición de Frege a admitir un mundo matemático de objetos ideales se refleja en la postura que éste mantuvo en relación con las geometrías no euclídeas: “A las geometrías no euclídeas les reconoce posibilidad lógica, pero no están de acuerdo con la intuición. Del único espacio del que tenemos una representación es del euclídeo. (...) Pero su empeño en mirar como construcciones caprichosas las geometrías no euclídeas y no reconocerles el mismo valor matemático que a la euclídea, radica a mi entender en su empeño en no reconocer un universo de entes ideales propio y específico para la matemática, cuyas leyes están regidas por la consistencia y no por nuestras representaciones interiores, ya provengan de la intuición o de la experiencia”. (*Ibid*, p. 238). En un universo así, regido por el método de los objetos ideales de Hilbert, ambos tipos de geometrías tendrían el mismo valor y su aplicación al mundo de los objetos reales sería una cuestión extramatemática.

¹¹ *Ibid*, p. 241.

¹² Carta de Frege a Hilbert, con fecha del 27 de diciembre de 1899. FREGE, G., Philosophical and mathematical correspondance, B. Mc Guinness (ed.), Oxford, 1980, p. 39.

entró en la matemática cuando «*Riemann construyó un modelo en que el postulado de las paralelas era falso mientras que los demás axiomas eran verdaderos. Con ello quedaba de manifiesto que una teoría matemática puede tener más de un modelo, entendiendo por tal una interpretación del lenguaje de la teoría que hace verdaderos sus axiomas*»¹³. En otras palabras:

“En un famoso y antiguo ejemplo, Beltrami (1868) mostró que las líneas en la geometría plana no euclidiana de Lobatchevsky y Bolyai (la geometría hiperbólica plana) pueden ser representadas por las geodésicas en una superficie de curvatura negativa constante en el espacio euclidiano. Así la geometría hiperbólica plana es consistente, si la geometría euclidiana es consistente. (Otro modelo de similar intención fue suministrado por Klein (1871) en términos de geometría proyectiva plana con métrica de Cayley (1859); lo cual puede ser interpretado como un modelo en el plano euclidiano. (Cfr. Young 1911, Lecciones II y III). La geometría analítica de Descartes (1619), es decir, el uso de coordenadas para representar objetos geométricos, constituye un método general para establecer la consistencia de teorías geométricas sobre la base del análisis, esto es, la teoría de los números reales. Las demostraciones de consistencia por el método de modelo son relativas. La teoría para la cual se construye un modelo es consistente si lo es aquella de donde se extrajo el modelo. Sólo cuando esta última teoría es inatacable, puede darnos el modelo una demostración absoluta de consistencia”¹⁴.

¹³ CAÑÓN LOYES, C., La Matemática. Creación y descubrimiento. Universidad Pontificia Comillas (UPCO), Madrid, 1993, pp. 241-242.

¹⁴ KLEENE, S.C., Introducción a la metamatemática, p. 58.

APÉNDICE III:

«EL FORMALISMO CUÁNTICO»

Según la interpretación que se asuma de la mecánica cuántica, se llega a un conjunto de postulados o a otros, de ahí que no haya un único sistema postulacional de esta teoría. Entre las distintas posibilidades he elegido la exposición de Galindo y Pascual¹. He preferido ésta a cualquier otra porque en ella se ha adoptado la interpretación de Bohr a la hora de desarrollar tales postulados. Dada esta postura, son seis los postulados fundamentales que conforman la base de dicho formalismo.

Primer Postulado

«A cada sistema físico le corresponde un espacio de Hilbert complejo y separable. En este espacio correspondiente tenemos un rayo unidad $|\Psi(t)\rangle_{\mathbb{R}}$, tal que representa en un instante t un estado puro de tal sistema. De ahí que un elemento $|\Psi(t)\rangle$ del rayo $|\Psi(t)\rangle_{\mathbb{R}}$ se denomina *vector estado* o *ket*».

Este postulado estipula las condiciones de los *estados puros* de los sistemas físicos en el ámbito de la mecánica cuántica. Teniendo en cuenta que la definición de “estado” implica que el sistema ha sido preparado para una manipulación experimental bajo las mismas operaciones experimentales relevantes, un estado puro en mecánica clásica es aquel donde posiciones y velocidades se controlan con precisión ilimitada, y donde el estado está representado por un punto del espacio fásico, de donde resulta que el conocimiento sobre el estado del sistema es máximo y la medida de cualquier observable sobre sistemas idénticamente preparados da el mismo resultado en todos ellos. Frente a este tipo de estado está el *estado mezcla*, que, clásicamente, se atribuyó a sistemas clásicos de muchas partículas, donde se da una restricción práctica del control total del estado, por ello se considera que ofrece una información parcial del estado del sistema porque las medidas de uno de los observables presentan dispersión a pesar de que los sistemas han sido idénticamente preparados.

¹ GALINDO, A./ PASCUAL, P., Mecánica Cuántica, 2 vols.

En mecánica cuántica el *estado puro*, en sentido clásico es imposible, debido a las relaciones de indeterminación y la interacción aparato-sistema. Pero si se distingue entre *medidas de primera especie* o preparaciones y *medidas de segunda especie*, podemos hablar de una *preparación maximal* en las mediciones de primera especie, donde el sistema cuántico ha sido preparado controlando el mayor número posible de observables compatibles independientes y, gracias a ella, puede hablarse de estado puro de un sistema cuántico, donde se ha obtenido un estado para el sistema del que disponemos de la mayor información cuántica posible. En cuanto al *estado mezcla*, se definirá simplemente como aquél donde la preparación no es maximal.

Dado que no todos los observables cuánticos son compatibles, se darán casos, evidentemente, donde los valores de los observables sufran dispersión aun en un *estado cuántico puro*, porque lo importante aquí es que la información que arrojen las medidas de primera especie sea todo lo completa que las condiciones cuánticas permiten.

Ahora bien, el contenido de este postulado habla, además de estados puros, de los *espacios de Hilbert*, caracterizados como *complejos* y *separables*, y establece una correspondencia entre los estados puros y los *rayos unidad*.

Tales consideraciones se deducen de la estructura de la ecuación de Schrödinger, desde su interpretación probabilística, que conduce al uso de amplitudes complejas, cuyos módulos al cuadrado $|\Psi(x; t)|^2$ debían ser de integral 1 en todo el espacio, ya que representan densidades de probabilidad; es decir, la función de onda representativa de un estado de una partícula debe ser un elemento de norma unidad del espacio de Hilbert complejo y separable $L^2(\mathbb{R}^3)$.

Hay, además, otras consideraciones que avalan este postulado, como es el caso de la existencia de esquemas matemáticos muy generales que analizan los procesos de medida y que conducen lógicamente a estructuras hilbertianas sobre un cuerpo de números no especificado. No entraré en estos detalles, para los cuales me remito al capítulo 2 del manual de Galindo y Pascual.

Por último, será el tercer postulado el que aclare cómo dos vectores estado de un mismo rayo conducen a las mismas distribuciones de probabilidad, convirtiéndose, así, en representantes equivalentes del estado del sistema.

Segundo Postulado

«Todo observable de un sistema físico se representa en el formalismo matemático de la mecánica cuántica mediante un operador lineal autoadjunto que actúa en el espacio de Hilbert del sistema físico considerado»

El objetivo de este postulado es fijar las condiciones de los “*observables*” en mecánica cuántica. Frente al primer postulado que determinó la correspondencia para los estados puros, el de ahora contiene la caracterización matemática de los observables.

En primer lugar, se ha de recordar que aquello que caracteriza al formalismo matemático de la mecánica cuántica es la necesidad de introducir elementos representativos de los estados posibles del sistema físico y de las magnitudes observables del mismo, aquellas magnitudes físicas medibles en él con un aparato. Ahora bien, la justificación de este postulado deberá esperar, como ocurrió con una parte del postulado I, al análisis de la interpretación estadística de la medición propuesta desde el tercer postulado. Aunque, de momento, puedo señalar que el postulado II *no* afirma que todo operador autoadjunto represente algún observable, ni tampoco exige que el operador A , representativo de un observable, sea acotado, pues, en general, esta propiedad no se satisface en el contexto del formalismo cuántico.

En cuanto al segundo elemento de este postulado, la introducción de *operadores lineales autoadjuntos*, se ha de subrayar la distinción fundamental entre operadores simétricos, $A \subseteq A^\dagger$, y operadores autoadjuntos, $A = A^\dagger$. A veces, dado un operador simétrico, puede hallarse una extensión autoadjunta del mismo, pero no siempre es posible; sólo cuando las funciones φ , producto de la descomposición espectral de A que permite definir un cálculo funcional asociado a ella, definidas sobre \mathbb{R} , son acotadas sobre $\sigma(A)$, el signo \subseteq puede sustituirse por el signo de $=$, es decir se convierten en operadores autoadjuntos.

Pues bien, todo operador autoadjunto A en un espacio de Hilbert \mathcal{H} tiene un espectro $\sigma(A)$ puramente real y que además su espectro residual es vacío. Esto es, su espectro es la unión (disjunta) del *espectro puntual* $\sigma_p(A)$ y del *espectro continuo* $\sigma_c(A)$. Si, y sólo si, $\lambda \notin \sigma_p(A)$, la ecuación $A|f\rangle = \lambda|f\rangle$, $|f\rangle \notin \mathbf{D}(A)$ tiene soluciones no-nulas.

La explicación es la siguiente: todo número real $\lambda \in \sigma_p(A)$ recibe el nombre de “*valor propio*” de A , y las soluciones no-nulas de la ecuación anterior se denominan “*vectores propios*” de A correspondientes al valor

propio λ ; tales soluciones para un número real tal que $\lambda \in \sigma_p(A)$ forman un *subespacio lineal cerrado* $M_\lambda(A)$, llamado subespacio propio o característico correspondiente al valor propio λ . Ahora bien, se llama *multiplicidad* del valor propio λ a la dimensión de $M_\lambda(A)$. En $M_\lambda(A)$ se puede elegir una base ortonormal cuyos elementos se indicarán por $|\lambda; \alpha\rangle$, donde λ indica el valor propio y α aquellos índices necesarios para distinguir entre los distintos vectores propios dentro de la base ortonormal. Para operadores autoadjuntos A es inmediato probar que los vectores propios correspondientes a valores propios distintos son ortogonales, por lo que los vectores propios independientes de A se pueden elegir de forma que constituyan un conjunto ortonormal, que en general no será completo en el espacio de Hilbert \mathcal{H} . Estas aclaraciones en las notaciones servirán para entender mejor los siguientes postulados.

Retomaré las funciones φ , definidas en \mathbb{R} y acotadas sobre $\sigma(A)$, si φ_A es una función de A , y φ es real sobre $\sigma(A)$, el operador φ_A es autoadjunto. De ahí que para todo boreliano $\Delta \subseteq \mathbb{R}$, de función característica φ_Δ , el operador autoadjunto $\varphi_\Delta(A)$ es un proyector espectral $E_A(\Delta)$. Así pues, en términos de la descomposición espectral, para un operador autoadjunto cualquiera y usando sus “funciones” propias, éstas pueden desarrollarse, al menos en un subespacio denso en \mathcal{H} , como “combinación lineal” de funciones propias generalizadas de esos operadores.

Tercer Postulado

«Si un sistema físico se encuentra en un estado puro descrito por un vector normalizado $|\psi\rangle$, entonces la probabilidad de que al medir un observable A resulte un valor λ perteneciente a un boreliano $\Delta \subseteq \mathbb{R}$ viene dada por:

$$P_{A,\psi}(\Delta) = \|E_A(\Delta)\psi\|^2 \gg$$

Dicho postulado hace referencia a la *interpretación estadística de la medición cuántica*, es decir, a las condiciones que esta teoría establece para los resultados de medidas, y explica, como ya dije, que el postulado I establezca que dos vectores estado de un mismo rayo sean representantes equivalentes del estado del sistema, ya que conducen a las mismas distribuciones de probabilidad. A diferencia de los dos primeros postulados, que contienen la correspondencia entre los estados puros y los observables con los elementos matemáticos del formalismo, el tercero

establece la conexión entre los valores posibles resultantes al medir un cierto observable y dichos elementos matemáticos.

Lo primero a destacar es que se usa el mismo símbolo para el observable y para el operador autoadjunto que lo representa. Además, el resultado de la medida del observable A es siempre un valor que pertenece al espectro del operador autoadjunto que lo representa.

Otro elemento de este postulado es que describe un estado puro a partir de un vector normalizado $|\psi\rangle$ que pertenece a un cierto rayo unidad $|\psi\rangle_{\mathbb{R}}$, pero, dada la ecuación que lo rige, se hubieran obtenido las mismas probabilidades de haber usado cualquier otro elemento de $|\psi\rangle_{\mathbb{R}}$. Es decir, todos los elementos de $|\psi\rangle_{\mathbb{R}}$ dan origen a la misma distribución de probabilidades al medir cualquier observable de A . Esto significa que todos ellos describen el mismo estado físico; de ahí que se cumpla el *primer postulado*.

Pues bien, tanto las *probabilidades* $P_{A,\psi}(\lambda_n)$ como las *densidades de probabilidad* $\wp_{A,\psi}(\lambda_n)$ se interpretan de la siguiente forma: si se preparan N sistemas físicos idénticos, todos ellos en el mismo estado puro, describible mediante un vector normalizado $|\psi\rangle$, y en todos ellos se mide el observable A , se encontrará que si $\lambda \in \sigma_p(A)$, tal y como se estableció en el anterior postulado, este valor aparecerá como resultado de la medida $n(\lambda_n)$ veces, y si λ es interior a $\sigma_c(A)$, hallaremos $n(\lambda, \Delta\lambda)$ un resultado en el intervalo $(\lambda - \Delta\lambda/2, \lambda + \Delta\lambda/2) \subset \sigma_c(A)$, de forma que estas frecuencias de repetición convergen cuando $N \rightarrow \infty$ y $\Delta\lambda \rightarrow 0$ a sus valores teóricos.

Además, el *valor medio o esperado* del observable A en el estado normalizado $|\psi\rangle$, que viene indicado por $\langle A \rangle_{\psi}$, se define como la media de los resultados obtenidos al efectuar un gran número N de medidas de este observable en N sistemas idénticos, todos ellos en el estado $|\psi\rangle$. De esta definición resulta que $\langle A \rangle_{\psi} = \langle \psi | A | \psi \rangle$, expresión que es válida si $|\psi\rangle$ está normalizado y pertenece al dominio de definición $\mathbf{D}(A)$ del operador A . En este punto, para obtener una cantidad que caracterice la dispersión de las medidas obtenidas, hay que introducir la llamada *dispersión cuadrática media o indeterminación*, definida, si $|\psi\rangle$ está normalizado, por:

$$\Delta_{\psi}A \equiv [\langle \psi | [A - \langle A \rangle_{\psi}]^2 | \psi \rangle]^{1/2}$$

De lo anterior se puede ver que son las *relaciones de indeterminación* las que rigen la exigencia de este tercer postulado. Por ello puede decirse que, dado un conjunto de sistemas físicos, todos en el mismo estado, al medir en cada uno el observable A se obtiene una

dispersión de valores, a no ser que el estado del sistema venga representado por un vector propio de A , pues en este caso, y sólo en este, $\Delta_\psi A = 0$, es decir, $|\psi\rangle$ es *libre de dispersión* para A . La relación de indeterminación nos dice que, en general, es imposible preparar los sistemas de forma que se puedan medir simultáneamente A y B con resultados de dispersión cuadrática media tan pequeña como se quiera para ambos, a no ser que $[A,B] = 0$. Si $[A,B] \neq 0$ y se prepara el sistema de forma que $\Delta_\psi A$ tenga un valor dado, entonces $\Delta_\psi B$ debe ser tal que se cumpla la relación de desigualdad:

$$\Delta_\psi A \cdot \Delta_\psi B \geq 1/2 |\langle \psi | [A,B] | \psi \rangle|$$

De ahí que esta relación de indeterminación establezca que, por lo general, al disminuir $\Delta_\psi A$ aumentará $\Delta_\psi B$, de forma que dicha desigualdad nunca deje de ser satisfecha. Dicho de otro modo, la relación de indeterminación expresa la alteración que en la potencialidad de los valores de la magnitud A en el estado $|\psi\rangle$ produce la actualización de los valores de B a través de su medida.

En cuanto a la vinculación de este tercer postulado con el segundo, destacaré los siguientes casos más simples que condujeron a dicho postulado II. Primeramente, dado un paquete de ondas (unidimensional) $\Psi(x; t)$, su módulo al cuadrado $|\Psi(x; t)|^2$ se interpreta como la densidad de probabilidad de hallar, en el instante t , la partícula en el punto x , tal y como establece el primer postulado. Por tanto, el *valor medio* de la posición sería el resultado de aplicar la igualdad entre el *estado normalizado* del observable A , $\langle A \rangle_\psi$, y el valor más probable del vector normalizado del operador A en el estado $|\psi\rangle$, como su estado propio, esto es, $\langle A \rangle_\psi = \langle \psi | A | \psi \rangle$, asociando al observable posición el operador autoadjunto X , operación que viene expresada matemáticamente en la siguiente fórmula:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} dx x |\Psi(x; t)|^2$$

Por otro lado, y del mismo modo, si tomamos una onda plana representativa de una partícula con momento p , este momento aparece como valor propio generalizado al aplicarle a dicha onda el operador autoadjunto $P = -i\hbar d/dx$; de aquí que este operador represente en $L^2(\mathbb{R})$ el *observable momento*.

Se podría objetar al postulado II la posibilidad de pensar que algunos observables viniesen representados por operadores simétricos, no extensibles a autoadjuntos, pues incluso para éstos el tercer postulado

establece que los valores medios experimentales calculados por la igualdad $\langle A \rangle_{\psi} = \langle \psi | A | \psi \rangle$ seguirían siendo números reales. Sin embargo un análisis cuidadoso, en el que el proceso de medición se descompone en procesos elementales, concluye que no puede ser así, ya que los aparatos que se usan para las mediciones tienen una escala de valores acotada y, por tanto, los operadores simétricos que les podrían ser asociados son acotados, y de aquí, autoadjuntos. Los observables no acotados en su escala de valores son idealizaciones por paso al límite, y bajo éste, los operadores correspondientes resultan ser autoadjuntos, dando, así, de nuevo, la razón al segundo postulado.

Por último, quiero señalar que un observable forma parte de un *Conjunto Completo de Observables Compatibles*, conocido por sus siglas C.C.O.C., de tal modo que, para un sistema físico se dice que el sistema de observables A, B, \dots forman un C.C.O.C. si cumple estas tres condiciones:

- 1) Los operadores correspondientes a estos observables son compatibles.
- 2) La base formada por los vectores propios simultáneos es única, salvo fases.
- 3) El sistema no es redundante, pues la segunda condición fallaría si se elimina algún observable de este sistema.

En cuanto al número de observables de un C.C.O.C. para un sistema físico dado, depende de la propia naturaleza de éste y las posibilidades experimentales.

Si preparamos un sistema, mediante montaje experimental, en estados con números cuánticos determinados para una serie de magnitudes físicas compatibles, y que sea completo, dentro de nuestros conocimientos experimentales (preparación maximal), obtenemos estados puros y físicamente ortogonales en el sentido de que difieren en algún número cuántico, siendo así la base ortogonal para un espacio de Hilbert. Y éste es el *espacio de Hilbert del sistema*, convenientemente idealizado en el límite de precisión infinita. Por construcción, la existencia de un C.C.O.C. está asegurada. Y dado otro estado puro, preparado mediante otro C.C.O.C., forzosamente será la combinación lineal de los anteriores, si admitimos, con el postulado I, que existe un único espacio de Hilbert ambiente que contiene a todos los vectores dados, y con el postulado III, que la suma de probabilidades de hallar, en ese estado, uno cualquiera de los valores de un observable que forma parte del primer C.C.O.C., es la unidad.

Esto es así porque, de la combinación de los tres primeros postulados, se deduce que, fijado un conjunto maximal de magnitudes compatibles, se puede preparar el sistema en ciertos estados puros que están representados por kets ortogonales y forman una base ortonormal completa

para el espacio de Hilbert del sistema; así, tomado otro conjunto maximal para la preparación de estados puros, éstos estarán, pues representados por kets combinación lineal de los anteriores.

Cuarto Postulado

«Si un sistema físico se halla en el estado ρ , el estado resultante tras la medida ideal de un observable A , filtrante para los valores en el conjunto Δ , viene descrito por la matriz densidad $\rho_{A,\Delta}$:

$$\rho_{A,\Delta} = \frac{1}{\text{Tr}(\rho E_A(\Delta))} \sum_{a \in \Delta} E_{M_a} \rho E_{M_a}$$

El objetivo de este postulado es establecer las condiciones de los *estados mezcla*, que pueden ser descritos mediante un **operador** o **matriz densidad**.

Esto es, de lo dicho anteriormente se resume que si del estado de un sistema físico se tiene *información maximal*, es decir, si se ha hecho una preparación en la que se han fijado los valores de un C.C.O.C., se dice que el sistema se halla en un estado puro, que queda descrito mediante un vector normalizado $|\psi\rangle$, totalmente determinado salvo fase. Sin embargo, hemos de poder incluir en el desarrollo teórico del formalismo cuántico estados sobre los que sólo se tiene una información parcial, es decir, estados mezcla. Es aquí donde entra en juego el operador densidad, con el que describimos este tipo de estado, mediante la matriz densidad ρ tal que:

$$\rho \equiv \sum_i |\psi_i\rangle p_i \langle \psi_i|$$

Siendo p_i la probabilidad de que el sistema se halla en el estado $|\psi_i\rangle$. Una de las propiedades de este operador densidad es que ρ es autoadjunto y acotado, lo cual viene así anotado: $\rho^\dagger = \rho$.

Cualquier operador ρ que cumpla esta condición, más la de ser un operador positivo, $\rho \geq 0$, y, además, dada una base ortonormal y teniendo en cuenta las condiciones de las probabilidades, es de traza finita, $\text{Tr}(\rho) = 1$, entonces puede considerarse candidato a operador densidad: por ser ρ autoadjunto positivo, la condición $\text{Tr}(\rho) = 1$ asegura que ρ es un operador compacto.

Como consecuencia del postulado III, sabemos que, por un lado, cuando sobre un sistema físico en un estado puro $|\psi\rangle$ se realiza la medida de un observable A , sólo pueden aparecer como resultados de la misma valores

que corresponden a puntos del espectro de dicho operador, y por otro, cómo se puede calcular la probabilidad de un cierto resultado. Para el sistema en un estado mezcla descrito por un operador densidad ρ la expresión del postulado III, $P_{A,\psi}(\Delta) = \|E_A(\Delta)\psi\|^2$, que calcula la probabilidad de obtener un valor en el boreliano $\Delta \subseteq \mathbb{R}$, se generaliza, como resultado físico de la expresión de la matriz densidad, dada más arriba, inmediatamente a:

$$P_{A,\rho}(\Delta) = \sum_i p_i P_{A,\psi_i}(\Delta) = \text{Tr}(\rho E_A(\Delta))$$

Supongamos ahora que en un cierto sistema físico se quiere medir el observable A . Si inmediatamente antes de la medida el sistema se halla en un estado puro representado por un vector $|\psi\rangle$, el tercer postulado también nos permite calcular, mediante $P_{A,\psi}(\Delta) = \|E_A(\Delta)\psi\|^2$, cuál es la probabilidad de hallar como resultado de la misma un valor $a \in \Delta$. Al efectuar la medida se obtiene uno, y uno sólo, de los resultados posibles, y, en consecuencia, es lógico que el estado del sistema después de la medición contenga de alguna forma la información obtenida en el proceso de medida, y sea, en general, distinto del estado $|\psi\rangle$ de partida. La forma cómo la medición altera el estado del sistema viene estipulado por este cuarto postulado.

Aquí es importante recordar la distinción entre medidas de segunda especie, donde el proceso de medición destruye la propiedad medida sobre el sistema, y las preparaciones o medidas de primera especie, en las que, mediante un montaje experimental, se prepara el sistema en un estado con valores concretos de determinados observables, de forma que, medidos éstos inmediatamente después, tienen con certeza los mismos valores con que los preparamos. Así pues, para una medida cualquiera es imposible hacer afirmaciones concretas sobre el estado del sistema después de la misma, pues incluso el sistema puede quedar destruido; sin embargo, para medidas de primera especie, por ser al mismo tiempo preparaciones, el estado resultante no es arbitrario. De ahí que una *medida ideal* de un observable A es una medida de primera especie efectuada de tal modo que el aparato afecta lo menos posible al estado.

Todas estas consideraciones son el desarrollo del contenido del postulado IV y sólo me queda indicar que todo cambio en el estado tras una medición ideal es lo que se llama *reducción del paquete de ondas* o *colapso del estado*, lo cual nos lleva al siguiente postulado. La reconciliación entre este tipo de cambio irreversible, estocástico, y el cambio determinista

asociado a la evolución temporal, es el problema crucial de la teoría de la medición en mecánica cuántica.

Quinto Postulado

«En el intervalo de tiempo entre dos medidas consecutivas, los estados puros de un sistema físico siguen siendo puros, y existe en cada rayo unidad $|\Psi(t)\rangle_R$ algún vector estado $|\Psi(t)\rangle$ representativo de forma que la evolución viene dada por la *ecuación de Schrödinger*:

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\Psi(t)\rangle = H(t) |\Psi(t)\rangle$$

donde $H(t)$ es un observable llamado *hamiltoniano* del sistema. Los observables del sistema están representados por operadores constantes en el tiempo, salvo si los aparatos que miden aquéllos presentan variación explícita con el mismo, en cuyo caso los operadores representativos deben incorporarla»

Este postulado puede llamarse el “postulado dinámico”, porque con los postulados anteriores, referentes a la descripción de los estados y observables, a los resultados de las medidas a los cambios de los estados bajo éstas, se ha sentado la “cinemática” de la mecánica cuántica, pues se ha supuesto tácitamente que las medidas se realizaban en un instante determinado, despreciando el tiempo real de duración. Sin embargo, no se ha dicho nada de cómo varían los estados y los observables, al evolucionar el tiempo, entre dos procesos de medida consecutivos. De esto trata este postulado y de ahí su nombre, “dinámico”.

La exigencia de la conservación de la estructura matemática en el transcurso del tiempo, para sistemas cerrados, conduce, en formulaciones básicas de la mecánica cuántica, a idéntica conclusión: el proceso de evolución puede describirse manteniendo fijos los observables fundamentales X, P , y haciendo variar el estado de acuerdo con la ecuación de Schrödinger. Cuando los sistemas no son cerrados, sino que están en interacción con fuentes externas, clásicas sobre las que despreciamos la reacción de la interacción con el sistema cuántico (que no es el caso en un proceso de medición), entonces la evolución temporal se supone regida en forma análoga al caso de sistemas cerrados, pero con hamiltoniano que puede ser variable en el tiempo.

En cuanto a la notación, señalaré que es frecuente referirse a $H(t)$ como el *operador energía* del sistema, aunque esta denominación sea solamente apropiada cuando $H(t)$ no depende explícitamente del tiempo.

Dada la ecuación de Schrödinger y de la definición de operador densidad, se obtiene la ecuación de evolución de este operador, tal que los estados mezcla evolucionan de acuerdo a:

$$i\hbar \frac{d\rho(t)}{dt} = [H(t), \rho(t)]$$

De aquí que la constancia supuesta para los pesos estadísticos p_n en el tiempo es expresión de que durante la evolución temporal nuestra información sobre las componentes puras de ρ no cambia. Por otro lado, la admisión de p_n variables con t imposibilitaría la descripción equivalente de la evolución a través de la imagen de Heisenberg.

Una propiedad importante de la ecuación de Schrödinger es que durante la evolución entre dos medidas la norma del vector estado no cambia. Otra es que se trata de una ecuación lineal, y su integración en un intervalo t_0, t debe conducir a un operador lineal isométrico (esto es, que conserva las normas), denominado operador de evolución $U(t, t_0)$, tal que:

$$|\Psi(t)\rangle = U(t, t_0)|\Psi(t_0)\rangle$$

De esta ecuación y de las propiedades de $U(t, t_0)$ se sigue la manera en que los estados mezcla evolucionan. También se puede hallar en el caso de sistemas conservativos, es decir, un sistema cuyo operador de Hamilton, u observable de energía, no dependa explícitamente del tiempo: si $|\Psi(t_0)\rangle$ es un estado propio de H con valor propio E , $H|\Psi(t_0)\rangle = E|\Psi(t_0)\rangle$, entonces el estado $|\Psi(t_0)\rangle$ es *estacionario*. En cambio, si E pertenece al espectro continuo de H , $|\Psi(t_0)\rangle$ se llama *estado de colisión*, su norma es infinita y tal estado se halla en el subespacio propio generalizado $\mathcal{H}(E)$ asociado al operador H .

En el caso de sistemas conservativos, es claro que una constante A del movimiento que no dependa explícitamente del tiempo conmuta con el operador H , y, por tanto, se puede elegir un C.C.O.C. de forma que tanto H como A formen parte del mismo.

Si para simplificar la notación, se suponen espectros puramente puntuales, la base ortonormal de los vectores propios comunes a todos los operadores del C.C.O.C. podrá escribirse como $\{|E_i, a_j; \alpha\rangle\}$, donde los índices α indican los valores propios de los otros observables del conjunto. Así, $|E_i, a_j; \alpha\rangle$ es un estado estacionario del sistema.

En resumen, la distribución de probabilidades de un observable, sin dependencia explícita en el tiempo, y constante del movimiento en un sistema conservativo, es independiente del tiempo. Ésta es una situación

general que se manifiesta en la ecuación $[E_A(\Delta), U(t, t_0)] = 0$ y en la igualdad del tercer postulado $P_{A,\psi}(\Delta) = \|E_A(\Delta)\psi\|^2$.

Un caso especial es la llamada “relación de indeterminación energía-tiempo”. Sea un sistema conservativo y un observable A del mismo, que no dependa explícitamente del tiempo, de acuerdo con lo dicho anteriormente, para un estado cualquiera $|\Psi(t)\rangle$ se obtiene:

$$\Delta_{\Psi}A \cdot \Delta_{\Psi}H \geq \frac{1}{2} |\langle \Psi(t) | [A, H] | \Psi(t) \rangle|$$

O bien, si tenemos en cuenta la *ley de evolución temporal de los valores esperados*, derivada de la ecuación de Schrödinger, se puede escribir de esta otra manera:

$$\Delta_{\Psi}A \cdot \Delta_{\Psi}H \geq \hbar/2 |d/dt \langle \Psi(t) | A | \Psi(t) \rangle|$$

La cantidad $\Delta_{\Psi}A$ es la indeterminación en la medida de A en el estado $|\Psi(t)\rangle$, mientras que $d/dt \langle \Psi(t) | A | \Psi(t) \rangle$ es la variación con el tiempo del valor esperado de A , es decir, la velocidad con que se desplaza el valor medio de la distribución de probabilidad de A en $|\Psi(t)\rangle$.

El tiempo será, pues, una estimación del intervalo de tiempo que se debe dejar transcurrir a partir de t para que la media de la distribución de valores de A se desplace en una cantidad $\Delta_{\Psi}A$.

En este sentido se puede considerar $\tau_{\Psi}(A)$ como un intervalo de tiempo característico de la evolución del sistema, en el instante t , con relación al observable A : si en el instante t se mide en muchos sistemas idénticos, todos ellos en el estado $|\Psi(t)\rangle$, dicho observable A , entonces la distribución estadística de los resultados de las medidas es esencialmente la misma que se obtiene al medir de forma análoga en el instante t' , con tal que $|t' - t| \ll \tau_{\Psi}(A)$.

La expresión matemática de esto es la siguiente:

$$\tau_{\Psi}(A) \equiv \frac{\Delta_{\Psi}A}{\left| \frac{d}{dt} \langle \Psi(t) | A | \Psi(t) \rangle \right|}$$

Por último, llamaré de nuevo la atención sobre la desigualdad $\Delta_{\Psi}A \cdot \Delta_{\Psi}H \geq \hbar/2 |d/dt \langle \Psi(t) | A | \Psi(t) \rangle|$, porque de ella se obtiene, propiamente, la relación de indeterminación energía-tiempo, cuya formulación precisa es:

$$\tau_{\Psi} \cdot \Delta_{\Psi}H \geq \hbar/2$$

Sexto Postulado

«Si en un sistema físico las coordenadas *cartesianas* de posición son q_1, q_2, \dots, q_N y p_1, p_2, \dots, p_N sus momentos conjugados correspondientes, entonces los operadores X_r, P_s , que representan estos observables en mecánica cuántica, deben satisfacer las reglas de conmutación:

$$[X_r, X_s] = 0, \quad [P_r, P_s] = 0$$
$$[X_r, P_s] = i\hbar\delta_{rs}I$$

Si el sistema tiene un observable cuya expresión clásica es $A(q_1, \dots, q_N, p_1, \dots, p_N; t)$, entonces en las aplicaciones usuales de la mecánica cuántica el operador correspondiente se obtiene a partir de dicha expresión, escrita de forma conveniente, sustituyendo en ella las variables q_r y p_s por los operadores X_r, P_s asociados»

Éste es el enunciado del sexto postulado, también llamado de **cuantificación canónica** y expresa las **reglas de cuantificación**. Es decir, en el postulado II se asoció a cada observable A de un sistema físico un operador autoadjunto, que también fue designado por A , pero no se dijo nada sobre la construcción de estos operadores. Ahora es el momento de hacer esto y es lo que establece este postulado: es una ley general sobre las reglas para la construcción de observables, que tengan un análogo clásico.

Este postulado tan sólo especifica los conmutadores entre los observables básicos, tipo posición y momento. En cambio, para determinar los operadores asociados de otros observables derivados, como momento angular, energía, etc., existen otros argumentos, aunque no entraré en ellos, muy generales que, además, han sido justificados por resultados experimentales.

Ahora bien, el método de construcción para los operadores correspondientes a observables con análogo clásico conduce a operadores formalmente autoadjuntos.

En la descripción de la evolución temporal en mecánica cuántica dada por el postulado quinto eran los estados los que llevaban el peso total de la evolución, mientras que los observables, estáticos en su montaje y funcionamiento, estaban representados por operadores constantes en el tiempo. Dado que la elección concreta de vectores $|\Psi(t)\rangle$ y operadores $A(t)$ representativos es irrelevante, con tal que tales cantidades no cambien, la elección que se realizó en el postulado V es sólo una de las muchas posibles y se llama "*imagen de Schrödinger*" para la descripción de la evolución temporal.

Entre las pocas imágenes de uso práctico, también se debe destacar la *imagen de Heisenberg*, sobre todo usada en teoría cuántica de campos, obtenida a partir de la de Schrödinger y un instante t_0 prefijado. Ambas imágenes coincidirán en $t = t_0$ y en la imagen de Heisenberg los estados no cambian en el transcurso de tiempo entre dos medidas. Otra de las imágenes importantes es la de *interacción* o *imagen de Dirac*, pero este breve apéndice no es el lugar para hablar de ellas.

Finalmente, sólo puedo apuntar que existe la posibilidad de que existan *reglas de superselección*, que limitarían la posibilidad de superponer coherentemente dos vectores estado arbitrarios. Tales reglas vendrían determinadas por los *observables de superselección*, éstos serían compatibles con todos los observables, de manera que podrían formar parte de cualquier C.C.O.C.; por otro lado, todos los operadores de superselección que conocemos (carga eléctrica y paridad del número de fermiones, o univalencia, y, en sentido aproximado, de acuerdo con las modernas teorías de gran unificación, las cargas bariónica y leptónicas) tienen espectro discreto, y no varían con el tiempo en imagen de Schrödinger, y, por tanto, tampoco en la Heisenberg. Siendo la evolución temporal un proceso continuo, un vector estado, en el transcurso del tiempo, permanece siempre en el mismo subespacio coherente. Por tanto, los números cuánticos de superselección son constantes del movimiento.

La última aclaración sobre esto es que el calificativo de reglas de “super”-selección, frente al de reglas de selección, se utiliza para señalar que, mientras es posible construir estados puros con números cuánticos bien determinados para observables constantes del movimiento ordinarios, es imposible hacer esto para los números cuánticos de superselección.

BIBLIOGRAFÍA

OBRAS FUENTE

Monografías

-BAUER, E./LONDON, F.: La théorie de l'observation en mécanique quantique, Paris, Hermann, 1939.

-BELL, J.S.: Speakable and unspeakable in quantum mechanics. Cambridge, Cambridge University Press, 1987.

Traducción castellana: Lo decible y lo indecible en mecánica cuántica. Traducido por José L. Sánchez Gómez. Madrid, Alianza Editorial, 1990.

Se cita por la edición castellana.

-BERGSON, H.: Essai sur les données immédiates de la conscience. París, Presses Universitaires de France (P.U.F.), 1967.

Traducción castellana: Ensayos sobre los datos inmediatos de la conciencia. Traducido por Domingo Barnés. Madrid, Biblioteca Moderna de Filosofía y Ciencias Sociales, 1925.

-BERGSON, H.: L'évolution créatrice. París, Presses Universitaires de France (P.U.F.), 1969.

Traducción castellana: La evolución creativa. Traducido por María Luisa Pérez Torres. Madrid, Espasa-Calpe, 1973.

Se cita por la edición castellana.

-BERGSON, H.: La pensée et le mouvant. París, Presses Universitaires de France (P.U.F.), 1969.

Traducción castellana: El pensamiento y lo moviente. Traducido por Heliodoro García. Madrid, Espasa-Calpe, 1976.

Se cita por la edición castellana.

-BOHM, D.: Causality and chance in modern physics, London, Routledge & Paul Kegan, 1957.

-BOHR, N.: Atomic Theory and the Description of Nature. Cambridge, Cambridge University Press, 1934.

Traducción castellana: La teoría atómica y la descripción de la naturaleza. Traducida por M. Ferrero Melgar. Madrid, Alianza Editorial, 1988.

Se cita por la edición castellana.

-BOHR, N.: Atomic Physics and Human Knowledge. New York, John Wiley and Sons, 1958.

Traducción castellana: Física atómica y conocimiento humano. Traducción de A. Yusta. Madrid, Aguilar, 1964.

Se cita por la edición castellana.

-BOHR, N.: Essays 1958-1962 on Atomic Physics and Human Knowledge. New York, John Wiley and Sons, 1963.

Traducción castellana: Nuevos ensayos sobre física atómica y conocimiento humano (1958-1963). Traducción de C. Rodríguez. Madrid, Aguilar, 1970.

Se cita por la edición castellana.

-BOHR, N.: The Theory of Spectra and Atomic Constitution. Cambridge, University Press, 1922.

-BOHR, N.: Collected works (9 vols.). Edited by L. Rosenfeld, J. R. Nielsen, E. Rüdinger (et al.). Amsterdam, North-Holland Publishing, 1971-1987.

-BOHR, N.: "Newton's Principles and Modern Atomic Mechanics". In The Royal Society, Newton Tercentenary Celebrations, Cambridge, The University Press, 1947.

-BOHR, N.: "Physical Science and the Study of Religions". In: Studia Orientalia Ioanni Petersen, Copenhagen, Einar Munksgaard, 1953, pp. 385-390.

-BOHR, N.: Niels Bohr's Archives, Karl Taylor Compton Lectures, delivered at Massachusetts Institute of Technology, November 21, 1957.

-BOHR, N.: Niels Bohr Gottingen Lectures, June 1922, Philadelphia, American Philosophical Society, 1967.

-BOHR, N.: On the Constitution of Atoms and Molecules; introduced by Leon Rosenfeld, Copenhagen, Munksgaard, 1963.

-BOHR, N.: Bohr scientific correspondance through 1922, Philadelphia, American Philosophical Society, 1967.

-BOHR, N.: Bohr scientific correspondance through 1923-1929, Philadelphia, American Philosophical Society, 1967.

-BOHR, N.: Bohr scientific correspondance through 1930-1945, Philadelphia, American Philosophical Society, 1967.

-BOHR, N.: Bohr scientific correspondance through 1946-1962, Philadelphia, American Philosophical Society, 1967.

-BOHR, N.: "Discussions with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics". In: SCHILPP, P.A. (ed.), Albert Einstein: Philosopher-Scientist (2 vols.). Illinois, The Library of Living Philosophers, 1969, pp. 199-242.

-BOHR, N.: "Analysis and Synthesis in Science". Introduction to Encyclopedia and Unified Science, Foundations of the Unity of Science, Vol. I, n° 1. In:

NEURATH, O. (ed.): International Encyclopedia of Unity of Science. Chicago, University Press, 1938.

-BOHR, N.: Complementary beyond physics (1928-1962); edited and introduced by David Favrholdt, Amsterdam, Elsevier, 1999.

-BOHR, N.: "Atomic Stability and Conservation Laws". In: Atti del Convegno di Fisica Nucleare della "Fondazione Alessandro Volta", Roma, Reale Accademia d'Italia, 1932.

-BOHR, N.: "The Causality Problem in Atomic Physics". In: New Theories in Physics, Paris, International Institute of Intellectual Collaboration, 1939, pp. 11-30.

-BOHR, N.: "Quantum Physics and Philosophy, Causality and Complementarity". In: KLIBANSKY, R., Philosophy in the Mid-century: A survey, Florence, La Nuova Italia Editrice, 1958, pp. 308-314.

-BOHR, N. (et al.): Natural Science, Selections from the Twentieth Century. Chicago, Encyclopedia Britannica, 1993.

-BORN, M.: Physics in my generation. London, Pergamon Press, 1956.

-BORN, M.: Natural Philosophy of Cause and Chance. Oxford, Clarendon Press, 1949.

-BORN, M.: The Restless Universe. New York, Dover Publications, 1951.

-BORN, M.: "Einstein's Statistical Theories". In: SCHILPP, P.A. (ed.): Albert Einstein: Philosopher-Scientist (2 vols.). Illinois, The Library of Living Philosophers, 1969, pp. 161-178.

-De BROGLIE, L.: Physique et Microphysique. París, Albin Michel, 1947.
Título en castellano: Física y Microfísica. Traducido por Cortés Pla. Madrid, Espasa Calpe, 1951.
Se cita por la traducción castellana.

-De BROGLIE, L.: La Physique Nouvelle et les Quanta. París, Ernest Flammarion, 1937.
Traducción castellana: La Física Nueva y los Cuantos. Traducida por Juan Guixé y revisada por Cora Ratto de Sadosky. Buenos Aires, Editorial Losada, 1965.
Se cita por la edición castellana.

-De BROGLIE, L.: Recherches d'un demi-siècle, Paris, Albin Michel, 1976.

-De BROGLIE, L.: La physique quantique restera-t-elle indéterministe?, Paris, Gauthier-Villars, 1953.

-De BROGLIE, L.: Nouvelles perspectives en microphysique, Paris, Albin Michel, 1956.

-De BROGLIE, L.: La théorie de la mesure en mécanique ondulatoire, Paris, Gauthier-Villars, 1957.

-De BROGLIE, L.: The current interpretation of wave mechanics: a critical study, Amsterdam, Elsevier, 1964.

-De BROGLIE, L.: "The Scientific Work of Albert Einstein". In: SCHILPP, P.A. (ed.): Albert Einstein: Philosopher-Scientist (2 vols.). Illinois, The Library of Living Philosophers, 1969, pp. 107-128.

-De BROGLIE, L.: "My meeting with Einstein at the Solvay Conference of 1927". In: FRENCH, A.P. (ed.): Einstein. A Centenary Volume. London and Edinburgh, Heinemann, 1979, pp. 14-17.

-DIRAC, P.A.M.: Directions in Physics; edited by H. Hora and J.R. Shepanski, Sidney, Wiley, 1965.

-EINSTEIN, A.: Essays on Science. New York, Philosophical Library, 1934.

-EINSTEIN, A.: "Autobiographical Notes". In: SCHILPP, P.A. (ed.): Albert Einstein: Philosopher-Scientist (2 vols.). Illinois, The Library of Living Philosophers, 1969 pp. 2-94 .

Traducción en castellano: Notas Autobiográficas. Madrid, Alianza Editorial, 1992. Se cita por la edición en castellano.

-EINSTEIN, A.: Ideas and Opinions. New York, Crown Publishing Company, 1954.

Traducción castellana: Mis ideas y opiniones. Traducción de José M. Álvarez Flórez y Ana Goldar. Barcelona, Antoni Bosch, 1981.

Se cita por la edición castellana.

-EINSTEIN, A.: The World as I See It. London, John Lane, 1935.

Traducción castellana: Mi visión del mundo. Traducción de Sara Gallardo y Marianne Bübeck. Barcelona, Tusquets, 2002.

-EINSTEIN, A.: Out of My Later Years. New York, Philosophical Library, 1950.

Traducción en castellano: De mis últimos años. Traducido por Arturo del Hoyo. Madrid, Aguilar, 1951.

-EINSTEIN, A.: Quanta. Mécanique statistique et physique quantique. Paris, Éditions du Seuil, 1989. Vol. I, Oeuvres choisies (6 vols.). Paris, Éditions du Seuil, 1989-1993.

-EINSTEIN, A.: Oeuvres choisies (6 vols.). Paris, Éditions du Seuil, 1989-1993.

-EINSTEIN, A.: The collected papers of Albert Einstein (8 vols). Princeton, University Press, 1987-1998.

- EINSTEIN, A.: "Remarks to the Essays Appearing in this Collective Volume". In: SCHILPP, P.A. (ed.): Albert Einstein: Philosopher-Scientist (2 vols.). Illinois, The Library of Living Philosophers, 1969, pp. 663-688.
- EINSTEIN, A.: "Exchange of letters with Niels Bohr". In: FRENCH, A.P. (ed.): Einstein. A Centenary Volume. London and Edinburgh, Heinemann, 1979, pp. 273-274.
- EINSTEIN, A.: "Geometry and experience". In: FRENCH, A.P. (ed.): Einstein. A Centenary Volume. London and Edinburgh, Heinemann, 1979, pp. 294-297.
- EINSTEIN, A.: "Notes on the origin of the general theory of relativity". In: FRENCH, A.P. (ed.): Einstein. A Centenary Volume. London and Edinburgh, Heinemann, 1979, pp. 306-309.
- EINSTEIN, A.: The meaning of relativity. Traducción castellana: Mis ideas y opiniones. Tercera edición. Traducido por Carlos E. Prélat. Incluye apéndice sobre la teoría relativista del campo no simétrico; traducido por Albino Arenas Gómez. Madrid, Espasa-Calpe, 1971.
Se cita por la edición castellana.
- EINSTEIN, A.: "On the method of theoretical physics". In: FRENCH, A.P. (ed.): Einstein. A Centenary Volume. London and Edinburgh, Heinemann, 1979, pp. 310-314.
- EINSTEIN, A.: Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie. Jerusalem, The Hebrew University.
Traducción en castellano: Sobre la teoría de la relatividad especial y general. Traducido por Miguel Paredes Larrucea. Madrid, Alianza Editorial, 1984.
Se cita por la edición en castellano.
- EINSTEIN, A.: Correspondance (1903-1955). Paris, Hermann, 1979.
Traducción en castellano: Correspondencia con Michele Besso (1903-1955). Barcelona, Tusquets, 1994. Edición, prólogo y notas de Pierre Speziali; traducción de Manuel Puigcerver.
- EINSTEIN, A.: Lettres à Maurice Solovine. Paris, Gauthier-Villars, 1956.
- EINSTEIN, A./BORN, M.: The Born-Einstein Letters. New York, Walker, 1971.
Edición francesa: Correspondance 1916-1955. Paris, Éditions du Seuil, 1972.
Existe traducción en castellano: Correspondencia 1916-1955. México, Editorial Siglo XXI, 1973.
Se cita por la edición francesa.
- EINSTEIN, A./GRÜNBAUM, A./EDDINGTON, A.S. (y otros): Relativity theory: its origins and impact on modern thought. New York, John Wiley & Sons, 1968.

Traducción en castellano: La teoría de la relatividad: sus orígenes e impacto sobre el pensamiento moderno. Selección e introducción de L. Pearce Williams; traducción de Miguel Paredes Larrucea. Madrid, Alianza Universidad, 1989.
Se cita por la edición en castellano.

-EVERETT III, H.: The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics, Princeton, University Press, 1973.

-FREGE, G. (recop): Kleine Schriften. Hildesheim, Georg Olms, 1967.
Traducción en castellano: Estudios sobre semántica. Traducido por Ulises Moulines; introducción de Jesús Mosterín. Barcelona, Orbis, 1985.

-HEISENBERG, W.: Der Teil und das Ganze. Gespräche im Umkreis der Atomphysik. München, R. Piper & Co. Verlag, 1969.
Traducción en castellano: Diálogos sobre física atómica. Madrid, Biblioteca de Autores Cristianos, 1972.
Se cita por la edición en castellano.

-HEISENBERG, W.: Physics and Philosophy. The Revolution in Modern Science. New York, Harper and Row, 1958.
Traducción en castellano: Física y filosofía. Buenos Aires, Ediciones La Isla, 1959.
Se cita por la edición en castellano.

-HEISENBERG, W.: Wandlungen in den Grundlagen der Naturwissenschaft. Leipzig, S. Hirzel, 1935.
Traducción en castellano: Los nuevos fundamentos de la ciencia. Madrid, Editorial Norte y Sur, 1962.
Se cita por la edición en castellano.

-HEISENBERG, W.: Schritte über Grenzen. Gesammelte Reden un Aufsätze. München, R. Piper & Co. Verlag, 1971.
Traducción en castellano: Más allá de la Física. Madrid, Biblioteca de Autores Cristianos, 1974.
Se cita por la edición en castellano.

-HEISENBERG, W.: Das Naturbild der heutigen Physik. Hamburg, Rowohlt, 1955.
Traducción en castellano: "La imagen de la naturaleza en la física actual". En: La imagen de la naturaleza en la física actual. Barcelona, Ariel, 1976, pp. 5-26.
Se cita por la edición en castellano.

-HEISENBERG, W.: "Remarks on the Origin of the Relations of Uncertainty". In: W.C. PRICE/S.S. CHISSICK (eds.): The Uncertainty Principle of Foundations of Quantum Mechanics. London, New York, John Wiley and Sons, 1977, pp. 3-6.

-HEISENBERG, W.: The Physical Principles of Quantum Theory. Chicago, University Press, 1930.

-HEISENBERG, W.: Encounters with Einstein and Other Essays. Princeton, Princeton University Press, 1983.

-HEISENBERG, W.: Schritte Über Grenzen. Hamburg, R. Piper & Co., 1971.
Traducción inglesa: Across the Frontiers. London, Harper & Row, 1974.
Se cita por la edición en inglés.

-HEISENBERG, W.: "Quantum Theory and Its Interpretation". In: ROZENTAL, S. (ed.), Niels Bohr: his life and work as seen by his friends and colleagues, Amsterdam, North-Holland, 1967.

-HEISENBERG, W./BOHR, N.: Die Kopenhagener Deutung der Quantentheorie. Stuttgart, Ernst Battenberg Verlag, 1963.

-HILBERT, D.: Grundlagen der Geometrie. Leipzig/Berlín, B. G. Teubner, 1923.
Traducción en castellano: Fundamentos de la Geometría. Traducción de Francisco Cebrián; introducción de José Manuel Sánchez Ron. Madrid, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), 1991.
Se cita por la edición en castellano.

-HILBERT, D.: Wissen und mathematisches Denken (Lecture 1922/23). Göttingen, Mathematisches Institut Universität Göttingen, 1988 (reimp.).

-JORDAN, P.: Physics of the Twentieth Century, New York, Philosophical, 1944.

-KANT, I.: Kritik der reinen Vernunft. Hamburg, Felix Meiner, 1965.
Traducción en castellano: Crítica de la razón pura. Traducido por Pedro Rivas (2ª edición). Madrid, Ediciones Alfaguara, 1999.
Se cita por la edición en castellano.

-KUHN, T. (et al.): Archive for the History of Quantum Physics, "Interview with Professor Niels Bohr", 1962.

-LANDÉ, A.: Quantum mechanics, Cambridge, University Press, 1951.

-LANDÉ, A.: Foundations of quantum theory, New Haven, Yale University Press, 1955.

-LANDÉ, A.: From dualism to unity in quantum mechanics, Cambridge, University Press, 1960.

-LANDÉ, A.: New foundations of quantum mechanics, Cambridge, University Press, 1965.
Existe traducción en castellano: Nuevos fundamentos de la mecánica cuántica, Madrid, Tecnos, 1968.

-RUSSELL, B.: The Problems of Philosophy. Londres, Oxford University Press, 1912.
Traducción castellana: Los problemas de la filosofía. Traducido por Joaquín Xirau. Barcelona, Labor, 1991.

Se cita por la traducción castellana.

-PAULI, W.: Collected Scientific Papers, New York, Interscience, 1964.

-PLANCK, M.: Where is Science Going? New York, Norton, 1932.

Traducción en castellano: ¿A dónde va la ciencia? Prólogo de Albert Einstein; introducción biográfica de James Murphy; traducción de Felipe Jiménez de Asia. Buenos Aires, Losada, 1941.

Se cita por la edición en castellano.

-SCHRÖDINGER, E.: Collected papers on Wave Mechanics. London, Blackie, 1928.

-SCHRÖDINGER, E.: My View of th World. Cambridge, University Press, 1964.

-SCHRÖDINGER, E.: Nature and the Greeks. Cambridge, University Press, 1954.

-VIGIER, P.: "Hidden parameters associated with possible internal motions of elementary particles". In: BUNGE, M.(ed.), Quantum theory and reality, Berlín, Springer, 1967, pp.90-97.

-WITTGENSTEIN, L.: Tractatus Logico-Philosophicus. Annalen der Naturphilosophie. Madrid, Alianza Editorial, 1987. (Edición bilingüe).

Revistas

-ASPECT, A.: "Experimental test of Bell's inequalities with correlated photons". Cuadernos de Ontología, 1, (2000), pp. 147-170.

-ASPECT, A.: "Experimental test of Bell's inequalities in Atomic Physics". Atomic Physics, 8, (1982).

-BELL, J.S.: "On the Einstein Podolsky Rosen Paradox". Physics, 1, n°3, (1964), pp. 195-200.

-BELL, J.S.: "On the Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics". Review of Modern Physics, 38, (1966), pp. 447-475.

-BOHM, D.: "A Suggested Interpretation of Quantum Theory in Terms of *Hidden Variables*" Physical Review, 85, (1952), pp. 166-193.

-BOHR, N.: "Causality and Complementarity". Philosophy of Science, 4, n° 3, (1937), pp. 289-298.

-BOHR, N.: "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?". Physical Review, 48, (1935), pp. 223-237.

-BOHR, N.: "Physical Science and Man's Position". Philosophy Today, 67, (1957).

- BOHR, N.: "The Quantum of Action and the Description of Nature". Naturwissenschaften, **17**, (1929), pp. 483-486. (Reprinted in: Atomic Theory and the Description of Nature, pp.92-101).
- BOHR, N.: "Atomic Physics and International Cooperation". Proceedings of the American Philosophical Society, **91**, (April 1947).
- BOHR, N.: "On the Constitution of Atoms and Molecules". Philosophical Magazine, **26**, (1913), pp. 1-25, 476-502, 857-875.
- BOHR, N.: "A Challenge to Civilization". Science, **102**, (1945).
- BOHR, N.: "The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory". Supplement to Nature, **121**, (1928), pp. 580-590. (Reprinted in: Atomic Theory and the Description of Nature, pp. 52-91).
- BOHR, N.: "Quantum Mechanics and Physical Reality". Nature, **136**, (13 Jul. 1935).
- BOHR, N.: "Natural Philosophy and Human Cultures", Nature, **143**, (1939), pp. 483-486. (Reprinted in: Atomic Physics and Human Knowledge).
- BOHR, N.: "On the Notions of Causality and Complementarity". Dialectica, **2**, (1948), pp. 312-319.
- BOHR, N.: "Light and Life", Nature, **131**, (1933), pp. 423-459. (Reprinted in: Atomic Physics and Human Knowledge, pp. 3-12).
- BOHR, N.: "Chemistry and the Quantum Theory of Atomic Constitution" (Bohr's Faraday Lecture of 8 May 1930). Journal of the Chemical Society, **26**, (1932), pp. 349-384.
- BOHR, N.: "The Spectrum of Helium and Hydrogen". Nature, **92**, (1913), pp. 231 and f.
- BOHR, N.: "Atomic Models and X-ray Spectra". Nature, **92**, (1914), pp. 553 and ff.
- BOHR, N.: "On the Effect of Electric and Magnetic Fields on Spectral Lines". Philosophical Magazine, **27**, (1914), pp. 506-524.
- BOHR, N.: "On the Series Spectrum of Hydrogen and Structure of the Atom". Philosophical Magazine, **29**, (1915), pp. 332-335.
- BOHR, N.: "The Spectra of Hydrogen and Helium". Nature, **95**, (1915), pp. 6 and ff.
- BOHR, N.: "On the Quantum Theory of Radiation and the Structure of the Atom". Philosophical Magazine, **30**, (1915), pp. 394-415.
- BOHR, N.: "Atomic Structure". Nature, **107**, (1921), pp. 104-107.

- BOHR, N.: "The Structure of the Atom". Nature, **112**, (1923), pp. 29-44.
- BOHR, N.: "On the Application of the Quantum Theory to the Structure of the Atom". Proceedings of the Cambridge Philosophical Society Supplement, **22**, (1924), pp. 1-42.
- BOHR, N.: "Atomic Theory and Mechanics". Nature, **116**, (1925), pp. 25-51.
- BOHR, N.: "Atomic Theory and Wave Mechanics". Nature, **119**, (1927), pp. 262 and ff.
- BOHR, N.: "Philosophical Aspect of Atomic Theory". Nature, **125**, (1930), pp. 958 and ff.
- BOHR, N.: "The Use of the concepts of Space and Time in Atomic Theory". Nature, **127**, (1931), pp. 43 and ff.
- BOHR, N.: "Biology and Atomic Physics". Nature, **143**, (1939), pp. 268-272. (Reprinted in: Atomic Physics and Human Knowledge, pp.13-22).
- BOHR, N.: "Natural Philosophy and Human Cultures". Nature, **143**, (1939), pp. 268-272. (Reprinted in: Atomic Physics and Human Knowledge, pp.23-31).
- BOHR, N.: "On Atoms and human Knowledge". Daedalus, **87**, (1958), pp. 164-174.
- BOHR, N./KRAMERS, H.A./SLATER, J.C.: "The Quantum Theory of Radiation". The Philosophical Magazine, **47**, (1924), pp. 785-802.
- BORN, M.: "Obituary Article on Arnold Sommerfeld". Obituary Notices of Fellows of the Royal Society, **8**, n° 21, (1952), pp. 275 and ff.
- BOTHE, W./GEIGER, H.: "Über das Wesen des Comptoneffekts; eine experimentelles Beitrag zur Theorie des Strahlung". Naturwissenschaft, **13**, (1925).
- BROUWER, L.E.J.: "Intuitionism and formalism". Bulletin of the American Mathematical Society **20**, 1913, reimpr. 1975.
- CAMPBELL, N.R./JORDAN, P.: "Philosophical Foundations of Quantum Theory". Nature, **119**, (1927).
- COMPTON, A.H.: "The Softening of Secondary X-rays". Nature, **108**, (1921), pp. 366 ff.
- COMPTON, A.H.: "Secondary radiations produced by X-rays, and some of their Applications to Physical Problems". Bulletin of the National Research Council, **56**, (1922), pp. 18 ff.
- COMPTON, A.H./SIMON, A.W.: "Directed Quanta of scattered X-rays". The Physical Review, **26**, (1925).

- DARWIN, C.G.: "A Quantum Theory of Optical Dispersion". Nature, **110**, (1922).
- DAVISSON, C.J./GERMER, L.H.: "The Scattering of Electrons by a single Crystal of Nickel". Nature, **119**, (1927), pp. 558-560.
- De BROGLIE, L.: "A Tentative Theory of Light Quanta". The Philosophical Magazine, **47**, (1924), pp. 446-458.
- De BROGLIE, L.: "Ondes et Quanta". Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, **177**, (1923), pp. 507-510.
- De BROGLIE, L.: "Quanta de lumière, diffraction et interférences". Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, **177**, (1923), pp. 548-550.
- De BROGLIE, L.: "Les quanta, la théorie cinétique et le principe de Fermat". Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, **177**, (1923), pp. 630-632.
- De BROGLIE, L.: "Sur la possibilité de relier les phénomènes d'interférences et diffraction à la théorie des quanta de lumière". Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, **183**, (1926).
- EINSTEIN, A.: "Zur Elektrodynamik bewegter Körper". Annalen der Physik, (1905), **17**, pp. 891-921.
- EINSTEIN, A.: "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt". Annalen der Physik, **17**, (1905), pp. 133-143
- EINSTEIN, A.: "Die Plancksche Theorie der Strahlung und die Theorie de Spezifischen Wärme". Annalen der Physik, **22**, (1907), pp. 180-190.
- EINSTEIN, A.: "Über die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung". Physikalische Zeitschrift, **10**, (1909), pp. 819-821.
- EINSTEIN, A.: "Zum gegenwärtigen Stand des Strahlungsproblems". Physikalische Zeitschrift, **10**, (1909).
- EINSTEIN, A.: "Quantentheorie der Strahlung". Physikalische Zeitschrift, **18**, (1917).
- EINSTEIN, A.: "Über ein den Elementarprozess der Lichtemission betreffendes Experiment". Sitzungsberichte der Königlich akademie der Wissenschaften zu Berlin, phys.-math. Klasse, (1921).
- EINSTEIN, A.: "Zur Theorie der Lichtfortpflanzung in dispergierenden Medien". Sitzungsberichte der Königlich akademie der Wissenschaften zu Berlin, phys.-math. Klasse, (1922), pp. 18-22.

- EINSTEIN, A.: "Quantentheorie des einatomigen Gases". Sitzungsberichte der Königlich akademie der Wissenschaften zu Berlin, phys.-math. Klasse, (1924), pp. 261-267.
- EINSTEIN, A.: "Zur Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption". Annalen der Physik, **20**, (1926), pp. 199-206.
- EINSTEIN, A.: "Physics and Reality". Journal of the Franklin Institute, **221**, (1936), pp. 313-382.
- EINSTEIN, A.: "Considerations concerning the Fundamentals of Physics". Science, **91**, (1940), pp. 487-492.
- EINSTEIN, A.: "Quantenmechanik und Wirklichkeit". Dialectica, **2**, (1948).
- EINSTEIN, A./TOLMAN, R.C./PODOLSKY, B.: "Knowledge of Past and Future in Quantum Mechanics". Physical Review, **37**, (1931), pp. 780-781.
- EINSTEIN, A./PODOLSKY, B./ROSEN, N.: "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?". The Physical Review, **47**, (1935), pp.777-780.
- EPSTEIN, P.S./EHRENFEST, P.: "The Quantum Theory of the Fraunhofer Diffraction". Proceedings of the National Academy of Sciences, **10**, (1924), pp. 133-139.
- EVERETT, H.: "*Relative State* Formulation of Quantum Mechanics". Reviews of Modern Physics, **29**, (1957), pp. 454-462.
- HEISENBERG, W.: "Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischer Kinematic und Mechanik". Zeitschrift für Physics, **43**, (1927), pp. 172-198.
Traducción en inglés: "The Physical Content of Quantum Kinematics and Mechanics". In: J.A. WHEELER/M.Z. ZUREK (eds.): Quantum Theory and Measurement. Princeton, Princeton University Press, 1953, pp. 62-84.
Se cita por la edición inglesa.
- HEISENBERG, W.: "Über quantentheoretischer Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen". Zeitschrift für Physik, **33**, pp.879-893.
- HØFFDING, H.: "On Analogy and its Philosophical Importance". Mind, **14**, (1905).
- JEANS, J.: "A Comparison between two Theories of Radiation". Nature, **72**, (1905).
- KELVIN, Lord (W. THOMSON): "Nineteenth-century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light".The Philosophical Magazine, **2**, (1901), pp. 1-40.

- KRAMERS, H.A.: "The Quantum Theory of Dispersion". Nature, **114**, (1924), 310 and f.
- MILLIKAN, R.A.: "A direct photoelectric Determination of Planck's h ". The Physical Review, **7**, (1916), pp.355-388.
- PAULI, W.: "Niels Bohr on his Sixtieth Birthday". Reviews of Modern Physics, **17**, (1945).
- RAYLEIGH, Lord (R.J. STRUTT): "The Dynamical Theory of Gases and Radiation". Nature, **72**, (1905).
- RICHARDSON, O.W./COMPTON, K.T.: "The Photoelectric Effect". The Philosophical Magazine, **24**, (1912), pp. 575-594.
- SCHRÖDINGER, E.: "Are There Quantum Jumps?". British Journal of the Philosophy of Science, **3**, (1952).
- SLATER, J.C.: "Radiation and Atoms". Nature, **113**, (1924), pp. 307-308.
- SOLOMON, J.: "Sur l'indeterminisme de la mécanique quantique". Journal de Physique **4**, (1933), 34-37.
- WEIZSÄCKER, C.F.von: "Komplementarität und Logik". Naturwissenschaften, **42**, (1955), pp.521-529, 545-555.
- WIGNER, E.P.: "On Hidden Variables and Quantum Mechanical Probabilities". American Journal of Physics, **38**, (1970), pp. 1005-1009.

OBRAS DE CONSULTA

Monografías

- AASERUD, F.: Redirecting science: Niels Bohr, philanthropy and the rise of nuclear physics, Cambridge University Press, 1990.
- AGAZZI, E.: Temi e problemi di filosofia della fisica, Roma, Edizioni Abete, 1974.
Traducción en castellano: Temas y problemas de filosofía de la física. Barcelona, Herder, 1978.
Se cita por la versión castellana.
- ALBERT, D.Z.: Quantum Mechanics and Experience. Cambridge, Harvard University Press, 1992.
- ALEKSANDROV, A.D. (et al.): Mathematics: Its Content, Methods, and Meaning. Massachussets, Massachussets Institute of Technology, 1956.
Traducción en castellano: La matemática: su contenido, métodos y significado (3 vols). Traducido por Manuel López Rodríguez. Madrid, Alianza Editorial, 1994.

Se cita por la edición en castellano.

-ALVÁREZ-ESTRADA, R.F.: “Teorías de variables ocultas y resultados experimentales”. En: SÁNCHEZ DEL RÍO, C. (coordinador), Física Cuántica, pp. 1060-1072.

-ARANA, J.: “Causalidad y objetividad. Schrödinger y el trasfondo filosófico de la física cuántica”. En: MATAIX, C./RIVADULLA, A. (eds.), Física cuántica y realidad. Madrid, Editorial Complutense, 2002, pp. 73-96.

-AUDI, M.: The Interpretation of Quantum Mechanics, Chicago, University Press, 1973.

-AYER, A.J. (recop.): Logical Positivism. Chicago, The Free Press of Glencoe, 1959.

Traducción castellana: El positivismo lógico. Traducido por L. Aldama, U. Frisch, C.N. Molina, F.M. Torner y R. Ruiz Harrel. México, Fondo de Cultura Económica, 1965.

Se cita por la edición castellana.

-BALIBAR, F./DARRIGOL, O./JECH, B. (rec.): *L'article de Bohr, Kramers et Slater (BKS)*. En: EINSTEIN, A., Quanta. Mécanique statistique et physique quantique, pp. 162-169.

-BASTIN, E.W. (ed.): Quantum Theory and Beyond, Cambridge, University Press, 1971.

-BARFOED, N. (et al.) (eds.): The challenge of an open world: essays dedicated to Niels Bohr, Copenhagen, Munksgaard, 1989.

-BAUMANN, K./SEXL, R.(ed.): The interpretations of Quantum Mechanics, Braunschweig, Vieweg, 1983.

-BELIFANTE, F.J.: A Survey of Hidden-Variables Theories, Oxford, Pergamon Press, 1979.

-BENSAUDE-VINCENT, B.: “Francia: una acogida difícil”. En: DELIGEORGES, S.: El mundo cuántico. Madrid, Alianza Editorial, 1990, pp. 63-74.

-BERGIA, S.: “Einstein and the birth of special relativity”. In: FRENCH, A.P. (ed.): Einstein. A Centenary Volume. London and Edinburgh, Heinemann, 1979, pp. 65-90.

-BIERI, P./HORSTMANN, R./KRÜBER, L.(eds.): Transcendental Arguments and Science, Dordrecht, Reidel, 1979.

-BLACK, M.: Models and Metaphors, Ithaca, Cornell University Press, 1962.
Existe traducción en castellano: Modelos y Metáforas, Madrid, Tecnos, 1967.

- BOER, J. de/DAL, E./ULFBECK, O. (eds.): The Lesson of quantum theory: Niels Bohr Centenary Symposium October 3-7, 1985, Amsterdam, North-Holland for the Royal Danish Academy of Sciences and Letters, 1986.
- BOHR, H.: "My Father". In: ROZENTAL, S. (ed.), Niels Bohr: his life and work as seen by his friends and colleagues, Amsterdam, North-Holland, 1967.
- BONDI, H.: Relativity and Common Sense: a new approach to Einstein, New York, Garden City, 1964.
- BONDI, H.: "Relativity theory and gravitation". In: FRENCH, A.P. (ed.): Einstein. A Centenary Volume. London and Edinburgh, Heinemann, 1979, pp. 113-130.
- BRIDGMAN, P.W.: The nature of physical theory, Princeton, University Press, 1936.
- BROWN, H./BUTTERFIELD, J/PAGONIS, C. (eds.): Philosophy and Physics. Cambridge, Cambridge University Press, 1999.
- BRUNSCHVIG, L.: Les étapes de la philosophie mathématique. Paris, Librairie scientifique et technique A. Blanchard, 1972.
- BUB, J.: The Interpretation of Quantum Mechanics, Dordrecht, D. Reidel, 1974.
- BUNGE, M.: The philosophy of Niels Bohr, Montreal, Université du Québec, 1985.
- BUNGE, M.: Racionalidad y Realismo, Madrid, Alianza Editorial, 1985.
- BUNGE, M. (ed.): The critical approach to science and philosophy. London, Collier-Macmillan, 1964.
- BUNGE, M. (ed.): Quantum Theory and Reality, Berlin/New York, Springer, 1967.
- BUSCH, P./LAHTI, P./MITTELSTAEDT, P.: The Quantum Theory of Measurement (2nd ed). Heidelberg, Springer, 1996.
- CADENAS, Y.: "El origen de h y su significado físico y epistemológico en las primeras leyes cuánticas". En: MATAIX, C./RIVADULLA, A. (eds.), Física cuántica y realidad. Madrid, Editorial Complutense, 2002, pp. 171-194.
- CAÑÓN LOYES, C.: La Matemática. Creación y descubrimiento. Madrid, Universidad Pontificia Comillas (UPCO), 1993.
- CASARI, E.: Questioni di filosofia della matematica, Milano, Feltrinelli, 1964.
- CASSIDY, D.C.: Uncertainty. The Life and Science of Werner Heisenberg. New York, W. H. Freeman and Company, 1991.
- CELLUCI, C.(ed.): La filosofia della matematica, Bari, Laterza, 1967.

- COHEN, I.B.: "Einstein and Newton". In: FRENCH, A.P. (ed.): Einstein. A Centenary Volume. London and Edinburgh, Heinemann, 1979, pp. 40-42.
- COHEN, R.S./WARTOFSKY, M.W.: Logical and epistemological studies in contemporary physics, Dordrecht, D. Reidel, 1974.
- COHEN, R.S./WARTOFSKY, M.W.(eds.): Boston Studies in the Philosophy of Science, Dordrecht, D. Reidel, 1969.
- COHEN, R.S./STACHEL, J.J.(eds.): Selected Papers of Léon Rosenfeld, Dordrecht, D. Reidel, 1979.
- COLODNY, R.G. (ed.): Paradigms and Paradoxes. The Philosophical Challenge of the Quantum Domain. Pittsburgh, University of Pittsburgh Press, 1972.
- COLODNY, R.G.(ed.): Frontiers of Science and Philosophy, Pittsburgh, University Press, 1962.
- CUSHING, J.T.: Quantum Mechanics: Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony. Chicago, The University of Chicago Press, 1994.
- CHEVALEY, C.: "Una Nueva Ciencia". En: DELIGEORGES, S.: El mundo cuántico. Madrid, Alianza Editorial, 1990, pp. 35-49.
- DAVAL, R.: La Métaphysique de Kant. Perspectives sur la Métaphysique de Kant d'après la théorie du schématisme. Paris, Presses Universitaires de France, 1951.
- DAVIES, P.C.W.: About time: Einstein's unfinished revolution, London, Penguin books, 1995.
- DELIGEORGES, S.: Le monde quantique. Paris, Editions du Seuil, 1985.
Traducción en castellano: El mundo cuántico. Traducido por M^a Cristina Martín Sanz. Madrid, Alianza Editorial, 1990.
Se cita por la edición en castellano.
- D'AGOSTINO, S.: A History of the Ideas of Theoretical Physics: Essays on the Nineteenth and Twentieth Century Physics, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2000.
- D'ESPAGNAT, B.: A la recherche du réel. Le regard d'un physicien. Paris, Bordas, 1981.
Traducción en castellano: En busca de lo real. La visión de un físico. Traducido por Tomás R. Fernández Rodríguez, Miguel Ferrero Melgar y José A. López Brugos. Madrid, Alianza Editorial, 1983.
Se cita por la edición en castellano.
- D'ESPAGNAT, B.: New Perspectives in Physics. New York, Basic Books, 1962.
- D'ESPAGNAT, B.: Conceptual Foundations of Quantum Mechanics. Massachusett, Benjamin (2nd. ed.), 1976.

- DINGLE, H.: "Scientific and Philosophical Implications of the Special Theory of Relativity". In: SCHILPP, P.A. (ed.): Albert Einstein: Philosopher-Scientist (2 vols.). Illinois, The Library of Living Philosophers, 1969, pp. 535-554.
- DUMMETT, M.: The Interpretation of Frege's Philosophy, London, Duckworth, 1981.
- DUMMETT, M.: Frege: Philosophy of Language, London, Duckworth, 1973.
- DUMMETT, M.: "The Philosophical Basis of Intuitionistic Logic". In: Truth and other Enigmas, London, Duckworth, 1978, pp. 215-247.
- FAVRHOLDT, D.: Niels Bohr's Philosophical Background, Copenhagen Commissioner Munksgaard, 1992.
- FAYE, J.: Niels Bohr: His Heritage and Legacy. An Anti-Realist View of Quantum Mechanics. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1991.
- FAYE, J.: The reality of the future. An essay on time, causation and backward causation. Odense, University Press, 1989.
- FAYE, J./FOLSE, H.J. (eds.): Niels Bohr and contemporary philosophy. Dordrecht, Kluwer, 1994.
- FEIGL, H./MAXWELL, G. (eds.): Current Issues in the Philosophy of Science, New York, Holt, Rinehart and Winston, 1961.
- FEINBERG, G.: "Philosophical Implications of Contemporary Particle Physics". In: COLODNY, R.G. (ed.): Paradigms and Paradoxes. The Philosophical Challenge of the Quantum Domain. Pittsburgh, University of Pittsburgh Press, 1972, pp. 33-46.
- FERNÁNDEZ-RAÑADA, A.: "La mecánica cuántica y el espacio vacío". En: MATAIX, C./RIVADULLA, A. (eds.), Física cuántica y realidad. Madrid, Editorial Complutense, 2002, pp. 315-332.
- FEUER, L.: Einstein and the Generations of Science, New York, Basic Books, 1974.
- FEYERABEND, P.K.: Realism, Rationalism and Scientific Method, Cambridge, University Press, 1981.
- FEYERABEND, P.K.: "Niels Bohr's Interpretation of the Quantum Theory". In: FEIGL, H./MAXWELL, G. (eds.), Current Issues in the Philosophy of Science, New York, Holt, Rinehart and Winston, 1961.
- FEYERABEND, P.K.: "Problems of Microphysics". In: COLODNY, R.G. (ed.), Frontiers of Science and Philosophy, Pittsburgh, University Press, 1962.
- FEYNMAN, R.P.: The character of the physical law. Cambridge (MA), MIT Press, 1967.

Traducción en castellano: El carácter de la ley física. Barcelona, Antoni Bosch, 1983.

Se cita por la edición en castellano.

-FINE, A.: “Some conceptual Problems of Quantum Theory”. In: COLODNY, R.G. (ed.): Paradigms and Paradoxes. The Philosophical Challenge of the Quantum Domain. Pittsburgh, University of Pittsburgh Press, 1972, pp. 3-32.

-FINE, A.: The Shaky Game. Einstein Realism and the Quantum Theorie. Chicago and London, The University of Chicago Press, 1986.

-FOCK, V.A.: “Filosofskie Voprosy Fiziki”. In: Fundamentals of Quantum Mechanics, MIR publishers, Moscú, 1978.

-FOLSE, H.: The Philosophy of Niels Bohr. The Framework of Complementarity. Amsterdam, North-Holland Physics Publishing, 1985.

-FRAASSEN, B.C.van: “A Formal Approach to the Philosophy of Science”. In: COLODNY, R.G. (ed.), Paradigms and Paradoxes. The Philosophical Challenge of the Quantum Domain. Pittsburgh, University of Pittsburgh Press, 1972, pp. 303-366.

-FRAASSEN, B.C.van: The Scientific Image. Oxford, University Press, 1980.

-FRAASSEN, B.C.van/HOOKER, C.A.: “A Semantic Analysis of Niels Bohr’s Philosophy of Quantum Theory”. In: HARPER, W.L./HOOKER, C.A. (eds.), Foundations of Probability Theory, Statistical Inferene, and Statistical Theories of Science, Dordrecht, Reidel, 1976.

-FRANK, P.G.: “Einstein, Mach, and Logical Positivism”. In: SCHILPP, P.A. (ed.), Albert Einstein: Philosopher-Scientist (2 vols.). Illinois, The Library of Living Philosophers, 1969, pp. 269-286.

-FRANK, P.: Einstein: His Life and Times, New York, A. A. Knopf, 1947.

-FRANÇOIS, L.: Niels Bohr et la physique quantique, Paris, Editions du Seuil, 2001.

-FRAYN, M.: Copenhagen, New York, Anchor Books, 2000.

-FRENCH, A.P. (ed.): Einstein. A Centenary Volume. London and Edinburgh, Heinemann, 1979.

-FRENCH, A.P.: “The story of general relativity”. In: FRENCH, A.P. (ed.): Einstein. A Centenary Volume. London and Edinburgh, Heinemann, 1979, pp. 91-112.

-FREUNDLICH, E: Los fundamentos de la teoría de la gravitación de Einstein. Prólogo de Albert Einstein; traducido de la cuarta edición alemana por José María Plans y Freyre. Madrid, Espasa-Calpe, 1920.

-FRIEDMAN, A.J./DONLEY, C.C.: Einstein as myth and muse, Cambridge, Cambridge University Press, 1985.

-GALINDO, A./PASCUAL, P.: Mecánica Cuántica (2 vols.). Madrid, Eudema, 1989.

-GAMOW, G.: "Reminiscence". In: FRENCH, A.P. (ed.): Einstein. A Centenary Volume. London and Edinburgh, Heinemann, 1979, pp. 29-30.

-GAMOW, G.: Thirty years that shook physics: the story of quantum theory, New York, Doubleday & Comp., 1966.

-GARCÍA-COLÍN, L. (et al.): Niels Bohr: científico , filósofo, humanista, México, Fondo de Cultura Económica, 1986.

-GRAY, J.: Ideas of Space 2/e. Oxford, Clarendon Press, 1979.
Traducción en castellano: Ideas de Espacio. Traducido por Fernando Romero y revisión de José Ferreirós. Madrid, Biblioteca Mondadori, 1992.
Se cita por la edición en castellano.

-GREENBERG, M.J.: Euclidean and non-euclidean geometries. New York, W.H. Freeman and Company, 1974.

-GÖDEL, K.: "A Remark About the Relationship Between Relativity Theory and Idealistic Philosophy". In: SCHILPP, P.A. (ed.): Albert Einstein: Philosopher-Scientist (2 vols.). Illinois, The Library of Living Philosophers, 1969, pp. 555-562/407.

-HAAR, D. ter. (ed.): The Old Quantum Theory, Oxford, Pergamon, 1967.

-HALSMAN, P.: "Einstein". In: FRENCH, A.P. (ed.): Einstein. A Centenary Volume. London and Edinburgh, Heinemann, 1979, pp. 27-28.

-HARPER, W.L./HOOKER, C.A. (eds.): Foundations of Probability Theory, Statistical Inferene, and Statistical Theories of Science, Dordrecht, Reidel, 1976.

-HEELAN, P.: Quantum Mechanics and Objectivity, The Hague, Martinus Nijhoff, 1965.

-HEILBRON, L./KUHN, T.S.: "The Genesis of the Bohr Atom". In: McCORMMACH, R. (ed.): Historical Studies in the Physical Sciences. Philadelphia, University of Pennsylvania Press, 1969.

-HEITLER, W.: "The Departure from Classical Thought in Modern Physics". In: SCHILPP, P.A., Albert Einstein: Philosopher-Scientist, pp. 179-198.

-HENDRY, J.: The creation of quantum mechanics and the Bohr-Pauli dialogue, Dordrecht, Reidel, 1984.

-HERMANN, G.: Les fondements philosophiques de la mécanique quantique. Paris, Librairie Philosophique J. Vrin, 1996.

-HESSE, M.: Revolutions and Reconstructions in the Philosophy of Science, Brighton, Harvester, 1980.

-HESSE, M.: Models and Analogies in Science, London, Sheed & Ward, 1963.

-HIGHFIELD, R./CARTER, P.: Albert Einstein: las vidas privadas de Albert Einstein, Madrid, ABC Folio, 2003.

-HOFFMANN, B./DUKAS, H.: Albert Einstein, Creator and Rebel, New York, The Viking Press, 1972.

-HOLTON, G.: The Scientific Imagination, Cambridge, University Press, 1978.

-HOLTON, G.: Thematic Origins of Scientific Thought, Cambridge (Mass.), Harvard University Press, 1973.

-HOLTON, G.: Ensayos sobre el pensamiento científico en la época de Einstein. Versión española de José Otero. Madrid, Alianza Editorial, 1982.

-HOLTON, G.: "What, precisely, is "thinking"? Einstein's answer". In: FRENCH, A.P. (ed.): Einstein. A Centenary Volume. London and Edinburgh, Heinemann, 1979, pp. 153-166.

-HONNER, J.: The Description of Nature. Niels Bohr and the Philosophy of Quantum Physics. Oxford, Clarendon Press, 1987.

-HOOKER, C.A.: "The Nature of Quantum Mechanical Reality: Einstein versus Bohr". In: COLODNY, R.G. (ed.): Paradigms and Paradoxes. The Philosophical Challenge of the Quantum Domain. Pittsburgh, University of Pittsburgh Press, 1972, pp. 67-302.

-HÖRZ, H.: "Philosophical concepts of space and time". In: FRENCH, A.P. (ed.): Einstein. A Centenary Volume. London and Edinburgh, Heinemann, 1979, pp. 229-242.

-INFELD, L.: "General Relativity and the Structure of Our Universe". In: SCHILPP, P.A. (ed.): Albert Einstein: Philosopher-Scientist (2 vols.). Illinois, The Library of Living Philosophers, 1969, pp. 475-500.

-JAKI, S. L.: The Origins of Science and the Science of its Origins. Edinburgh, Scottish Academic Press, 1978.

-JAMMER, M.: The Philosophy of Quantum Mechanics. The interpretations of quantum mechanics in historical perspective. New York, John Wiley and Sons, 1974.

-JAMMER, M.: The Conceptual Development of Quantum Mechanics. New York, Mc Graw-Hill, 1966.

-JAMMER, M.: Concepts of space: the history of theories of space in physics Foreword by Albert Einstein. New York, Dover, 1993.

-JAUCH, J.M.: Are Quanta Real? A Galilean Dialogue. Indiana, University Press, 1973.

Traducción en castellano: Sobre la realidad de los cuantos. Un diálogo galileano. Traducido por Miguel Paredes. Madrid, Alianza Editorial, 1985.

Se cita por la edición en castellano.

-KENNY, A.: Wittgenstein. Harmondsworth, Penguin, 1973.

Traducción en castellano: Wittgenstein. Traducido por Alfredo Deaño. Madrid, Alianza Editorial, 1995.

Se cita por la traducción castellana.

-KLEENE, S.C.: Introduction to Metamathematics. Amsterdam, North-Holland Publishing Company, 1952.

Traducción en castellano: Introducción a la Metamatemática. Traducido por Manuel Garrido. Madrid, Editorial Tecnos, 1974.

Se cita por la edición castellana.

-KLEIN, M.J.: "The First Phase of the Bohr-Einstein Dialogue". In: McCORMMACH, R. (ed.), Historical Studies in the Physical Sciences. (Vol. 2), Philadelphia, University of Pennsylvania Press, 1970.

-KLEIN, M.J.: "Einstein and the development of quantum physics". In: FRENCH, A.P. (ed.): Einstein. A Centenary Volume. London and Edinburgh, Heinemann, 1979, pp. 133-152.

-KLEIN, O.: "Glimpses of Niels Bohr as Scientist and Thinker". In: ROZENTAL, S., (ed.), Niels Bohr: his life and work as seen by his friends and colleagues, Amsterdam, North-Holland, 1967.

-KLIBANSKY, R.: Philosophy in the Mid-century: A survey, Florence, La Nuova Italia Editrice, 1958.

-KLINE, M.: Mathematics. The loss of certainty. Oxford, Oxford University Press, 1980.

-KOBZAREV, I. Yu.: Elementary particles: mathematics, physics and philosophy, Dordrecht, Kluwer Academic, 1989.

-KÖRNER, S.(ed.): Observation and Interpretation. London, Butterworths, 1957.

-KRIPKE, S.: "Naming and Necessity". In: DAVIDSON, D./HARMAN, Semantics of Natural Language. Dordrecht, Reidel, 1972.

-KUHN, T.S.: Black-body theory and the quantum discontinuity, 1894-1912. New York, Clarendon Press, 1978.

Traducción en castellano: La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica, 1894-1912. Versión en castellano de Miguel Paredes Larrucea. Madrid, Alianza Editorial, 1980.

Se cita por la edición en castellano.

-KUHN, T.S. (et al.): Sources for History of Quantum Physics. Philadelphia, American Philosophical Society, 1967.

-LENZEN, V.F.: "Einstein's Theory of Knowledge". In: SCHILPP, P.A. (ed.): Albert Einstein: Philosopher-Scientist (2 vols.). Illinois, The Library of Living Philosophers, 1969, pp. 355-384.

-LICOLN, B.: Einstein et l'univers Préface d'Albert Einstein. Paris, Gallimard, 1972.

-LONDON, F.W./BAUER, E.: La théorie de l'observation en mécanique quantique, Paris, Hermann, 1939.

-LURÇAT, F.: Niels Bohr: avant/après, Paris, Criterion, 1990.

-MacKINNON, E.: Scientific Explanation and Atomic Physics, Chicago, University Press, 1982.

-MARCO STIEFEL, B.: Evocación de Niels Bohr en su centenario, Madrid, Instituto de Estudios Pedagógicos Somosaguas, 1985.

-MARGENAU, H.: The nature of physical reality: a philosophy of modern physics. New York, McGraw-Hill Book Company, 1950.

Traducción en castellano: La naturaleza de la realidad física: una filosofía de la física moderna. Traducción de Adolfo Martín. Madrid, Tecnos, 1970.

Se cita por la edición castellana.

-MARGENAU, H.: "Einstein's Conception of Reality". In: SCHILPP, P.A. (ed.): Albert Einstein: Philosopher-Scientist (2 vols.). Illinois, The Library of Living Philosophers, 1969, pp. 243-268.

-MARLOW, A.R. (ed.): Mathematical Foundations of Quantum Theory. New York, Academic Press, 1978.

-MATAIX, C. / RIVADULLA, A. (eds.): Física cuántica y realidad. Madrid, Editorial Complutense, 2002.

-MESSIAH, A.: Quantum Mechanics. Amsterdam, North-Holland, 1961.

-McCORMMACH, R. (ed.): Historical Studies in the Physical Sciences. Philadelphia, University of Pennsylvania Press, 1969.

-MENGER, K.: "Modern Geometry and the Theory of Relativity". In: SCHILPP, P.A. (ed.): Albert Einstein: Philosopher-Scientist (2 vols.). Illinois, The Library of Living Philosophers, 1969, pp. 457-500.

-MERLEAU-PONTY, J.: Einstein. Paris, Flammarion, 1993.

Traducción en castellano: Albert Einstein. Vida, obra y filosofía. Traducido por Angel Luis Sanz Sáenz. Madrid, Alianza Editorial, 1994.

Se cita por la edición castellana.

- MEHRA, J.: The Solvay Conferences on Physics. Dordrecht, Reidel, 1975.
- MEHRA, J.(ed.): The Physicist's Conception of Nature. Dordrecht, Reidel, 1973.
- MEHRA, J./RECHENBERG, H.: The historical development of quantum theory, (9 vols.), New York, Springer, 2001.
- MITTELSTAEDT, P.: Philosophische Probleme der modernen Physik, Mannheim, Bibliographisches Institut, 1968.
Existe traducción en castellano: Problemas filosóficos de la física moderna, Madrid, Alhambra, 1969.
- MOORE, R.: Niels Bohr: the man, his science & the world they changed, London, Hodder & Stoughton, 1967.
- MURDOCH, D.: Niels Bohr's Philosophy of Physics. Cambridge, Cambridge University Press, 1987.
- NERSESSIAN, N.J.: Faraday to Einstein: Constructin Meaning in Scientific Theories, Dordrecht, Kluwer, 1984.
- NEUMANN, J. von: Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik. Berlin, Springer, 1932.
Traducción castellana: Fundamentos matemáticos de la mecánica cuántica. Madrid, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), 1991.
Se cita por la edición en castellano.
- NORRIS, C.: Quantum theory and the flight from realism: philosophical responses to quantum mechanics, London, Routledge, 2000.
- NORTHROP, F.S.C.: "Einstein's Conception of Science". In: SCHILPP, P.A. (ed.): Albert Einstein: Philosopher-Scientist (2 vols.). Illinois, The Library of Living Philosophers, 1969, pp. 385-407.
- OMNÈS, R.: Philosophie de la science contemporaine. Saint-Amand (Cher), Gallimard, 1994.
- OPPENHEIMER, J.R.: "On Albert Einstein". In: FRENCH, A.P. (ed.): Einstein. A Centenary Volume. London and Edinburgh, Heinemann, 1979, pp. 44-49.
- PAIS, A.: Subtle is the Lord... The Science and the Life of Albert Einstein. Oxford, University Press, 1982.
Traducción castellana: El Señor es sutil... La ciencia y la vida de A. Einstein. Traducido por Fidel Alsina, Barcelona, Ariel, 1984.
Se cita por la edición en castellano.
- PAIS, A.: "Einstein, Newton, and success". In: FRENCH, A.P. (ed.): Einstein. A Centenary Volume. London and Edinburgh, Heinemann, 1979, pp. 35-37.
- PAIS, A.: Niels Bohr's times: in physics, philosophy and polity, Oxford, Clarendon Press, 1991.

- PAPINEAU, D.: Theory and Meaning, Oxford, Clarendon Press, 1979.
- PARRINI, P. (ed.): Kant and contemporary epistemology. Dordrecht, Kluwer, 1994.
- PASACHOTF, N.E.: Niels Bohr: physicist and humanitarian, Berkeley, Enslow Publishers, 2003.
- PATY, M.: “La physique quantique ou l’entraînement de la pensée physique par les formes mathématiques”. En: MATAIX,C./RIVADULLA, A.(eds.), Física cuántica y realidad. Madrid, Editorial Complutense, 2002, pp. 97-134.
- PATY, M.: “Einstein en la Tempestad”. En: DELIGEORGES, S.: El mundo cuántico. Madrid, Alianza Editorial, 1990, pp. 51-62.
- PATY, M.: Einstein philosophe. La physique comme pratique philosophique. Paris, Presses Universitaires de France (P.U.F.), 1993.
- PATY, M.: La matière dérobée. L’appropriation critique de l’objet de la physique contemporaine. Paris, Éditions des Archives Contemporaines, 1988.
- PAULI, W./ROSENFELD, L./WEISSKOPF, V.: Niels Bohr and the development of physics: essays dedicated to Niels Bohr on the occasion of his seventieth birthday, Oxford, Pergamon Press, 1962.
- PAULI, W.: “Einstein’s Contributions to Quantum Theory”. In: SCHILPP, P.A. (ed.): Albert Einstein: Philosopher-Scientist (2 vols.). Illinois, The Library of Living Philosophers, 1969, pp. 147-160.
- PEACOCKE, C.: Holistic Explanation, Oxford, Clarendon Press, 1979.
- PEARS, D.: Wittgenstein. London, Fontana-Collins, 1971.
Traducción castellana: Wittgenstein. Traducido por José Planells. Barcelona, Grijalbo, 1973.
Se cita por la traducción castellana.
- PETERSEN, A.: Quantum Physics and the Philosophical Tradition, Cambridge (Mass.), M.I.T. Press, 1968.
- PETERSEN, A.: “On the Philosophical Significance of the Correspondence Argument”. In: COHEN, R.S./WARTOFSKY, M.W.(eds.), Boston Studies in the Philosophy of Science, Dordrecht, D. Reidel, 1969.
- PETRUCCIOLI, S.: Atoms, metaphors, and paradoxes: Niels Bohr and the construction of a new physics. Cambridge, University Press, 1993.
- PLANCK, M.: Scientific autobiography and other papers. Translated from german by Frank Gaynor. London, Williams & Norgate, 1950.
Traducción en castellano: Autobiografía científica y últimos escritos. Madrid, Nivola, 2000.

Se cita por la edición castellana.

-PLOTNITSKY, A.: Complementarity: anti-epistemology after Bohr and Derrida, Durham, Duke University Press, 1994.

-POPPER, K.R.: Quantum Theory and the Schism in Physics. From the Postscript to The Logic of Scientific Discovery. Edited by W. W. Bartley III, 1956.

Traducción en castellano: Teoría cuántica y el cisma en Física. Post Scriptum a La Lógica de la Investigación científica, vol. III. Traducción de Marta Sansigre Vidal. Madrid, Tecnos, 1992.

Se cita por la edición castellana.

-POPPER, K.R.: Búsqueda sin término: una autobiografía intelectual. Traducción del inglés por Carmen García Trevijano. Madrid, Tecnos, 1985.

-POPPER, K.R.: A world of propensities, Bristol, Thoemmes, 1990.

-POPPER, K.R.: "Quantum Mechanics without the Observer". In: BUNGE, M. (ed.), Quantum Theory and Reality, New York, Springer, 1967.

-POSY, C.J.(ed.): Kant's Philosophy of Mathematics. Dordrecht/Boston/ London, Kluwer Academic Publishers, 1992.

-POUL, D.: Niels Bohr (1885-1962): atomic theorist, inspirator, rallying point, Copenhagen, Royal Danish Ministry of Foreign Affairs, 1985.

-PRICE W.C./CHISSICK, S.S. (eds.): The Uncertainty Principle and Foundations of Quantum Mechanics. London/New York, John Wiley and Sons, 1977.

-PRZELECKI, M.: The logic of empirical theories, London, Routledge & Kegan Paul, 1969.

-PRZIBRAM, K.(ed.): Letters on Wave Mechanics: Albert Einstein, Erwin Schrödinger, Max Plack, H. A. Lorentz, London, Vision, 1968.

-PYENSON, L.: The Young Einstein: the Advent of Relativity. Bristol, Adam Hilger, Techno House, Radcliffe Way, 1985.

Traducción castellana: El joven Einstein. El advenimiento de la relatividad. Traducido por Rosa Álvarez Ulloa. Madrid, Alianza Editorial, 1990.

Se cita por la edición en castellano.

-REDHEAD, M.: "Non-locality and Peaceful Co-existence". In: SWINBURNE, R. (ed.), Space, Time and Causality, Dordrecht, Reidel, 1983, pp. 151-189.

-REICHENBACH, H.: Philosophic Foundations of Quantum Mechanics. Berkeley and Los Angeles, University of California Press, 1965.

-REICHENBACH, H.: The Rise of Scientific Philosophy. Berkeley, University of California Press, 1951.

Traducción en castellano: La filosofía científica. Traducido por Horacio Flores Sánchez. México, Fondo de Cultura Económica, 1953.

Se cita por la edición castellana.

-REICHENBACH, H.: "The Philosophical Significance of the Theory of Relativity". In: SCHILPP, P.A. (ed.): Albert Einstein: Philosopher-Scientist (2 vols.). Illinois, The Library of Living Philosophers, 1969, pp. 287-312.

-RIOJA, A.: "Sobre ondas y corpúsculos: un punto de vista lingüístico". En: MATAIX, C./RIVADULLA, A. (eds.), Física cuántica y realidad. Madrid, Editorial Complutense, 2002, pp. 135-154.

-RIVADULLA, A.: "La solución revolucionaria de Planck del problema de la radiación del cuerpo negro". En: MATAIX, C./RIVADULLA, A. (eds.), Física cuántica y realidad. Madrid, Editorial Complutense, 2002, pp. 43-56.

-ROBERTSON, H.P.: "Geometry as a Branch of Physics". In: SCHILPP, P.A. (ed.): Albert Einstein: Philosopher-Scientist (2 vols.). Illinois, The Library of Living Philosophers, 1969, pp. 313-330.

-ROBERTSON, P.: The Early Years: The Niels Bohr Institute, 1921-1930; foreword by Aage Bohr, Copenhagen, Akademisk Forlag, 1979.

-RORTY, R.: Philosophy and the Mirror of Nature, Oxford, Blackwell, 1980.

-ROSENFELD, L.: Niels Bohr: An Essay, Amsterdam, North Holland, 1961.

-ROSENFELD, L.: "Niels Bohr in the Thirties". In: ROZENTAL, S.(ed.), Niels Bohr: his life and work as seen by his friends and colleagues, Amsterdam, North-Holland, 1967.

-ROSENFELD, L.: "Misunderstandings about the Foundations of Quantum Theory". In: KÖRNER, S. (ed.): Observation and Interpretation. London, Butterworths, 1957.

-ROSENFELD, L./RÜDINGER, E.: "The Decisive Years: 1911-1918". In: ROZENTAL, S.(ed.), Niels Bohr: his life and work as seen by his friends and colleagues, Amsterdam, North-Holland, 1967.

-ROSENTHAL,./SCHNEIDER, I.: "Presuppositions and Anticipations in Einstein's Physics". In: SCHILPP, P.A. (ed.): Albert Einstein: Philosopher-Scientist (2 vols.). Illinois, The Library of Living Philosophers, 1969, pp. 129-146.

-ROZENTAL, S. (ed.): Niels Bohr: his life and work as seen by his friends and colleagues, Amsterdam, North-Holland, 1967.

-RUHLA, C.: The physics of chance: from Blaise Pascal to Niels Bohr, Oxford, University Press, 1992.

-SACHS, M.: Einstein versus Bohr. The Continuing Controversies in Physics. Illinois, Open Court Publishing Company, 1991.

- SÁNCHEZ DEL RÍO, C.: Los principios de la física en su evolución histórica. Madrid, Editorial de la Universidad Complutense, 1986.
- SÁNCHEZ DEL RÍO, C. (coord.): Física cuántica. Madrid, Ediciones Pirámide, 1997.
- SÁNCHEZ RON, J.M.: Historia de la física cuántica. Barcelona, Editorial Crítica, 2001.
- SÁNCHEZ RON, J.M.(et al.): Homenaje a Niels Bohr, Madrid, CSIC, 1985.
- SCHEIBE, E.: The Logical Analysis of Quantum Mechanics, London, Pergamon, 1973.
- SCHILPP, P.A. (ed.): Albert Einstein: Philosopher-Scientist (2 vols.). Illinois, The Library of Living Philosophers, 1969.
- SCHLICK, M.: Philosophy of nature. New York, Philosophical Library, 1949.
Traducción castellana: Filosofía de la naturaleza. Traducido y anotado por José Luis González Recio. Madrid, Ediciones Encuentro, 2002.
Se cita por la traducción castellana.
- SELLARS, W.: Science, perception and reality. London, Routledge & Kegan Paul, 1971.
Traducción en castellano: Ciencia, percepción y realidad. Traducido por Víctor Sánchez de Zavala. Madrid, Tecnos, 1971; “La filosofía y la imagen científica del Hombre”, pp. 9-49.
Se cita por la edición en castellano.
- SELLERI, F.: El debate de la Teoría Cuántica. Versión en castellano de Miguel Ferrero Melgar. Madrid, Alianza Editorial, 1986.
- SELLERI, F.: Quantum paradoxes and physical reality. Dordrecht, Kluwer, 1990.
- SELLERI, F.: “Weak and Strong Bell Type Inequalities”. En: MATAIX, C./RIVADULLA, A. (eds.), Física cuántica y realidad. Madrid, Editorial Complutense, 2002, pp. 231-248.
- SHANKLAND, R.S.: “Conversations with Albert Einstein”. In: FRENCH, A.P. (ed.): Einstein. A Centenary Volume. London and Edinburgh, Heinemann, 1979, pp. 38-39.
- SNOW, C.P.: “Albert Einstein 1879-1955”. In: FRENCH, A.P. (ed.): Einstein. A Centenary Volume. London and Edinburgh, Heinemann, 1979, pp. 3-8.
- SOLOVINE, M.: “Excerpts from a memoir”. In: FRENCH, A.P. (ed.): Einstein. A Centenary Volume. London and Edinburgh, Heinemann, 1979, pp. 9-12.
- SOMMERFELD, A.: “To Albert Einstein’s Seventieth Birthday”. In: SCHILPP, P.A. (ed.): Albert Einstein: Philosopher-Scientist (2 vols.). Illinois, The Library of Living Philosophers, 1969, pp. 97-106.

- SPEZIALI, P.: "Einstein writes to his best friend". In: FRENCH, A.P. (ed.): Einstein. A Centenary Volume. London and Edinburgh, Heinemann, 1979, pp. 263-270.
- STEIN, H.: "On the Conceptual Structure of Quantum Mechanics". In: COLODNY, R.G. (ed.): Paradigms and Paradoxes. The Philosophical Challenge of the Quantum Domain. Pittsburgh, University of Pittsburgh Press, 1972, pp. 367-438.
- STEWART, I.: Concepts of Modern Mathematics. Harmondsworth, Penguin Books, 1975.
Traducción en castellano: Conceptos de Matemática Moderna. Traducido por José María Fraile Peláez. Madrid, Alianza Editorial, 1988.
Se cita por la edición en castellano.
- STRATHERN, P.: Bohr & Quantum Theory. Traducción en castellano: Bohr y la teoría cuántica, Madrid, Siglo XXI de España Editores, 1999.
- STRAWSON, P.F.: The Bounds of Sense: an Essay on Kant's Critique of Pure Reason, London, Methuen, 1966.
- STRAWSON, P.F.: Skepticism and Naturalism, London, Methuen, 1985.
- STROHMEYER, I.: Quantentheorie und Transzendentalphilosophie. Heidelberg, Spektrum, 1995.
- STUEWER, R.H.: The Compton Effect: the Turning Point in Physics, New York, Science History, 1975.
- SWINBURNE, R. (ed.): Space, Time and Causality, Dordrecht, Reidel, 1983.
- TOMONAGA, S.-I.: Quantum Mechanics. Amsterdam, North-Holland, 1966.
- TÖRNEBOHM, H./EINSTEIN, A.: Concepts and principles in the space-time theory within Winstein's special theory of relativity. Göteborg, Elanders boktryckry aktiebolag, 1963..
- TOULMIN, S. (ed.): Physical Reality, London, Harper and Row, 1970.
- ULAM, S.: Adventures of a mathematician. New York, Scribner, 1976.
- ULLMANN-MARGALIT, E.: The scientific enterprise, Dordrecht, Kluwer, 1992.
- ULLMO, J.: "The agreement between mathematics and physical phenomena". In: BUNGE, M. (ed.): The critical approach to science and philosophy. London, Collier-Macmillan, 1964, pp. 350-359.
- USHENKO, A.P.: "Einstein's Influence on Contemporary Philosophy". In: SCHILPP, P.A. (ed.): Albert Einstein: Philosopher-Scientist (2 vols.). Illinois, The Library of Living Philosophers, 1969, pp. 607-646.

-VARADARAJAN, V.S.: Geometry of quantum theory, Princeton, Van Nostrand, 1968.

-VUILLEMIN, J.: “Física Cuántica y Filosofía”. En: DELIGEORGES, S.: El mundo cuántico. Madrid, Alianza Editorial, 1990, pp. 177-196.

-WAERDEN, B.L. van der: Sources of quantum mechanics, Amsterdam, North Holland, 1967.

-WEISSKOPF, V.: La Révolution des Quanta. Paris, Hachette, 1989.

Traducción en castellano: La revolución cuántica. Traducido por Faustino Barriuso Gutiérrez. Madrid, Akal, 1991.

Se cita por la edición en castellano.

-WEIZSÄCKER, C.F. von.: Zum Weltbild der Physik, Stuttgart, S. Hirzel, 1958.

Edición en inglés: The World View of Physics, London, Routledge and Kegan Paul, 1952.

Edición en castellano: La imagen física del mundo. Versión castellana de Eutimio Martino y Joaquín Sanz Guijarro. Madrid, Biblioteca de Autores Cristianos, 1974.

Se cita por la edición castellana.

-WEIZSÄCKER, C.F. von: The Unity of Nature, New York, Farrar Strauss Giroux, 1980.

-WENZL, A.: “Einstein’s Theory of Relativity Viewed from the Standpoint of Critical Realism, and Its Significance for Philosophy”. In: SCHILPP, P.A. (ed.): Albert Einstein: Philosopher-Scientist (2 vols.). Illinois, The Library of Living Philosophers, 1969, pp. 581-606.

-WEYL, H.: Philosophie der Mathematik und der Naturwissenschaften, Oldenburg, 1966.

Traducción en castellano: Filosofía de las Matemáticas y de la Ciencia Natural. México D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, 1965.

Se cita por la edición en castellano.

-WHEATON, B.R.: The Tiger and the Shark: Empirical Roots of Wave-Particle Dualism, Cambridge, University Press, 1983.

-WHEATON, B.R.: “El Duque de la Mecánica Ondulatoria”. En: DELIGEORGES, S.: El mundo cuántico. Madrid, Alianza Editorial, 1990, pp. 75-84.

-WHEELER, J.A.: “Memoir”. In: FRENCH, A.P. (ed.): Einstein. A Centenary Volume. London and Edinburgh, Heinemann, 1979, pp. 21-22.

-WHEELER, J.A.: “The Past and the Delayed Choice Double-Slit Experiment”. In: MARLOW, A.R. (ed.), Mathematical Foundations of Quantum Theory. New York, Academic Press, 1978, pp. 9-48.

-WHEELER, J.A./ZUREK, W.H. (eds.): Quantum Theory and Measurement. Princeton, Princeton University Press, 1983.

-WHITAKER, A.: Einstein, Bohr and the quantum dilemma, Cambridge, University Press, 1996.

-WHYTE, L.L.: "Reminiscences of Einstein". In: FRENCH, A.P. (ed.): Einstein. A Centenary Volume. London and Edinburgh, Heinemann, 1979, pp. 18-20.

-WICKES, W.C./ALLEY, C.O./JAKUBOWICZ, O.: "A *Delayed Choice* Quantum Mechanics Experiment". In: WHEELER, J.A./ZUREK, W.H. (eds.), Quantum Theory and Measurement. Princeton, Princeton University Press, 1983, pp. 457-461.

-WIGNER, E. P.: Symmetries And reflections, Bloomington/London, Indiana University Press, 1967.

-WILBER, K. (ed.): Quantum Questions
Traducción en castellano: Cuestiones cuánticas. Traducción de Pedro de Casso. Barcelona, Kairós, 1986.
Se cita por la edición castellana.

-WRIGHT, C.: Realism, Meaning and Truth, Oxford, Clarendon/University Press, 1987.

-ZINKERNAGEL, H.: "Bohr's relevance to philosophy and contemporary physics". En: MATAIX, C./RIVADULLA, A. (eds.), Física cuántica y realidad. Madrid, Editorial Complutense, 2002, pp. 155-170.

Revistas

-AHARONOV, Y./ALBERT, D.: "Is the usual notion of time evolution adequate for quantum mechanical systems I". Physical Review D, **29**, (1984), pp. 223-227

-ARANA, J.: "¿Es Idealista la Interpretación de Copenhague de la Mecánica Cuántica?". Cuadernos de Ontología, 1, (2000), pp. 185-202.

-BERGSTÖM, L.: "Underdetermination and Realism". Erkenntnis, **21**, (1984), pp. 349-365.

-BOYA, L.J.: "Rejection of the Light Quantum: the Dark Side of Niels Bohr". Physics/archiv.org.pdf., (2002).

-BUNGE, M.: "Strife about Complementarity". British Journal for the Philosophy of Science, **6**, (1955), pp. 1-12.

-BUSCH, P./LAHTI, P.J.: "A Note on Quantum Theory, Complementarity, and Uncertainty". Philosophy of Science, **32**, (1985), pp. 809-815.

-CASSIDY, D.C.: "Heisenberg, imprecisión y revolución cuántica". Investigación y ciencia. (Edición española de Scientific American), Temas 31, (2003), pp.6-13.

-CLAUSER, J.F./SHIMONY, A.: "Bell's Theorem: experimental tests and implications". Reports on Progress in Physics, **41**, (1978), pp. 1881-1927.

-CORDERO, A.: "Quantum physics and the critical revision of ontology". Cuadernos de Ontología, 1, (2000), pp. 135-146.

-CUSHING, J.T.: "Bohmian mechanics and its ontological commitments". Cuadernos de Ontología, 1, (2000), pp. 125-134.

-DALLA CHIARA, M.L.: "Unsharp Quantum Logics". International Journal of Theory Physics, **34**, (1995), pp. 1331-1336.

-DE WITT, B.: "Quantum Mechanics and Physical Reality", Physics Today, **23**, (1970).

-D'ESPAGNAT, B.: "Les implications philosophiques du Théoreme de Bell". Cuadernos de Ontología, 1, (2000), pp. 227-236.

-D'ESPAGNAT, B.: "Use of Inequalities for the Experimental Test of a General Conception of the Foundations of Microphysics". Physical Review D, **11**, n° 6, (1975), pp. 1424-1435.

-D' ESPAGNAT, B.: "Teoría cuántica y realidad". Investigación y ciencia. (Edición española de Scientific American), Temas 10, (1998), pp.13-27.

-DIRAC, P.A.M.: "La concepción física de la naturaleza". Investigación y ciencia. (Edición española de Scientific American), Temas 10, (1998), pp.4-12.

-DREYFUS, H.L./ RORTY, R./TAYLOR, C.: "A Discussion". Review of Metaphysics, **34**, (1980), pp.47-55.

-DUMMETT, M.: "Realism". Synthese, **52**, (1982).

-FAVRHOLDT, D.: "Niels Bohr and Danish Philosophy". Danish Yearbook in Philosophy, **13**, (1976), pp. 206-222.

-FAVRHOLDT, D.: "On Hoffding and Bohr. A Reply to Jan Faye". Danish Yearbook in Philosophy, **16**, (1979), pp. 73-77.

-FAVRHOLDT, D.: "The Cultural Background of the Young Bohr". Rivista di Storia della Scienza, **2**, n° 3, (1985), pp. 445-461.

-FAYE, J.: "The Influence of Harald Hoffding's Philosophy on Niels Bohr's Interpretation of Quantum Mechanics". Danish Yearbook in Philosophy, **16**, (1979), pp. 37-72.

-FAYE, J.: "The Bohr-Hoffding Relationship Reconsidered". Studies in History and Philosophy of Science, **19**, n° 3, (1988), pp. 321-346.

- FAYE, J.: "Review of Dugald Murdoch's *Niels Boh's philosophy of physics*". Isis, **81**, n° 2, (1990), pp. 278-279.
- FERRERO, M.: "The relevance of realism and locality in the construction of physics". Cuadernos de Ontología, **1**, (2000), pp. 115-123.
- FEYERABEND, P.K.: "Complementarity". Aristotelian Society Supplement, **32**, (1958), pp. 75-104.
- FEYERABEND, P.K.: "On a Recent Critique of Complementarity, Part I". Journal of Philosophy, **35**, (1968), pp. 309-331.
- FEYERABEND, P.K.: "On a Recent Critique of Complementarity, Part II". Journal of Philosophy, **36**, (1969), pp. 82-105.
- FINE, A.: "Realism in Quantum Measurements". Methodology and Science, **1**, (1968), pp. 215 ff.
- FINE, A.: "The Insolubility of the Quantum Measurement Problem". The Physical Review, **2D**, (1970), pp. 2783-2787.
- FINE, A.: "How to Count Frequencies: a Primer for Quantum Realists". Synthese, **42**, (1979), pp. 145-154.
- FINE, A.: "Some Local Models for Correlation Experiments". Synthese, **50**, (1982), pp. 279-294.
- FOLSE, H.: "Kantian Aspects of Complementarity". Kant Studien, **69**, (1978), pp. 58-66.
- FOLSE, H.: "Complementarity and the Description of Nature in Biological Science". Biology and Philosophy, **5**, (1990), pp. 211-224.
- FOLSE, H.: "Complementarity and the Description of Experience". International Philosophical Quarterly, **27**, (1977).
- GARBER, E.: "Some Reactions to Planck's Law, 1900-1914". Studies in the History and Philosophy of Science, **7**, (1976), pp. 89-126.
- GAUTHIER, Y.: "Quantum mechanics and the local observer". International Journal of Theoretical Physics, **22**, (1983), pp. 1141-1152.
- GEORGE, C./PRIGOGINE, I./ ROSENFELD, L.: "The Macroscopic Level of Quantum Mechanics". Nature, **240**, (1972), pp. 25-27.
- GLEASON, A.M.: "Measures on the Closed Subspaces of a Hilbert Space". Journal of Mathematics and Mechanics, **6**, (1957), pp. 885-893.
- GRÜNBAUM, A.: "Complementarity in Quantum Physics and Its Philosophical Generalisation". Journal of Philosophy, **54**, (1957).

- HALPIN, J.F.: "EPR Resuscitated: a Reply to Wessels". Philosophical Studies, **44**, (1983), pp. 111-114.
- HARDY, L.: "Quantum Mechanics, Local Realistic Theories and Lorentz-Invariant Realistic Theories". Physic Review Letters, **68**, (1992), p. 2981.
- HEGERFELD, G. C. / RUIJSENAARS, S. N. M.: "Remarks on causality, localization and spreading of wave packets". Physical Review D, **22**, (1995), pp. 377-384.
- HOLTON, G.: "The Roots of Complementarity". Daedalus, **99**, (1970).
- HONNER, J. R.: "Niels Bohr and the Mysticism of Nature". Zygon, **17**, (1982), pp. 243-253.
- HONNER, J. R.: "The Transcendental Philosophy of Niels Bohr". Studies in History and Philosophy of Science, **13**, (1982), pp. 1-29.
- HONNER, J. R.: "On the Term *Transcendental*". Milltown Studies, **11**, (1983), pp. 1-24.
- HORGAN, J.: "Filosofía cuántica". Investigación y ciencia. (Edición española de Scientific American), Temas 10, (1998), pp.36-45.
- HOWARD, D.: "Einstein On Locality and Separability". Studies in History and Philosophy of Science, **16**, (1985), pp.171-201.
- JARRET, J.P.: "On The Physical Significance of the Locality Conditions in the Bell Arguments". Noûs, **18**, (1984), pp. 569-589.
- KARGON, R.H.: "The conservative Mode: Robert A. Millikan and the twentieth-century Revolution in Physics". Isis, **68**, (1977), pp. 509-526.
- KLEIN, J.J.: "Einstein and the Wave-particle Duality". The Natural Philosopher, **3**, (1963), pp. 3-49.
- KLEPPNER, D./JACKIW, R.: "One Hundred Years of Quantum Physics". Science, vol. **289**, (2000), pp.893-898.
- KOSLOW, A.: "Ontology and Scientific Laws". Cuadernos de Ontología, **1**, (2000), pp. 61-72.
- KRAGH, H.: "Max Planck: the Reluctant Revolutionary". Physics World, **13**, nº12, (2000), pp.31-35.
- KRAUS, K.: "Complementary observables and uncertainty relations". Physical Review D **35**, (1987), pp. 3070-3075.
- KUHN, T.S.: "Revisiting Planck". Historical Studies in the Physical Sciences, **14**, (1984), pp. 231-252.

-LO, T.K./SHIMONY, A.: "Proposed Molecular Test of Local Hidden Variables Theories". The Physical Review A, **23**, (1981), pp. 3003-312.

-LOCHAK, G.: "Has Bell's Inequality a General Meaning for Hidden Variables Theories?". Foundations of Physics, **6**, (1976), pp.174-179.

-LOCKWOOD, M. (et al.): "*Many Minds* Interpretations of Quantum Mechanics". British Journal for the Philosophy of Science, **47**, (1996), pp.159-248.

-LÜBCKE, P.: "F.C. Sibbern: Epistemology as Ontology". Danish Yearbook of Philosophy, **13**, (1976), pp. 84-104.

-LURÇAT, F.: "Ontologie quantique selon Niels Bohr". Cuadernos de Ontología, **1**, (2000), pp. 213-226.

-McCORMMACH, R.: "Einstein, Lorenzt, and the Electron Theory". Historical Studies in the Physical Sciences, **2**, (1970).

-MERMING, N.D.: "What is Quantum Mechanics Trying to Tell Us?". American Journal of Physics, **66**, (1998), pp. 753-767.

-NAUENBERG, M./STROUD, C./YEAZELL, J.: "El límite clásico del átomo". Investigación y ciencia. (Edición española de Scientific American), Temas 31, (2003), pp.70-753.

-NIELSEN, J.R.: "Memories of Niels Bohr". Physics Today, **16**, (1963), pp. 22-30.

-NORTON, J.D.: "Science and Certainty". Synthes, **99**, (1994), pp. 3-22.

-OMNÈS, R.: "Una nueva interpretación de la mecánica cuántica: obtener la física clásica sin admitir otra cosa que las leyes cuánticas". Mundo Científico, vol. **163**, (1995), pp.1034-1040.

-OMNÈS, R.: "On Quantum Physics and the Categories of Philosophy". Cuadernos de Ontología, **1**, (2000), pp. 99-106.

-PAPINEAU, D.: "Probabilities and the Many Minds Interpretation of Quantum Mechanics". Analysis, **55**, (1995), pp. 239-246.

-PARK, J.L. / MARGENAU, H.: "Simultaneous Measurability in Quantum Theory". International Journal of Theoretical Physics, **1**, (1968).

-PATY, M.: "L'inseparabilité quantique en perspective". Fundamenta Scientae, Paris, (1982).

-PATY, M.: "Réflexions sur le concepts de temps". Revista de Filosofía, **25**, (2001), pp. 53-92.

-PATY, M.: "Interprétations et significations en physique quantique". Revue Internationale de Philosophie, **212**, (2000), pp. 17-60.

- PETERSEN, A.: "The Philosophy of Niels Bohr". Bulletin of the Atomic Scientists, **9**, (1963), pp. 8-14.
- PETRONI, N.C./VIGIER, J.-P.: "Causal Action-at-a-Distance Interpretation of the Aspect-Rapisarda Experiments". Physical Letters, **93A**, (1983), pp. 383-387.
- POPPER, K.R.: "Los peligros intelectuales". Teorema. Vol. XIV, nº1-2, (1981), pp.9-29.
- POST, H.R.: "Correspondence, Invariance and Heuristics". Studies in the History and Philosophy of Science, **2**, (1971), pp. 228-235.
- PROSSER, R.D.: "Quantum Theory and the Nature of Interference". International Journal of Theoretical Physics, **15**, (1976), pp. 181-193.
- RIOJA, A.: "Language, Physics and Reality in the Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics". Cuadernos de Ontología, **1**, (2000), pp. 171-184.
- RIOJA, A.: "La filosofía de la complementariedad y la descripción objetiva de la naturaleza". Revista de Filosofía. 3ª época, vol. V, nº 8, (1992), pp.257-282.
- RIOJA, A.: "Einstein: el ideal de una ciencia sin sujeto". Revista de Filosofía. 3ª época, nº2, (1989), pp.87-108.
- RIOJA, A.: "Los orígenes del principio de indeterminación". Theoria. Segunda Época, vol. X, (1995), nº 22, pp.117-143.
- ROBERTSON, H.P.: "The Uncertainty Principle". The Physical Review, **34**, (1929), pp. 163-164.
- RORTY, R.: "Verificationism and Transcendental Arguments". Nous, **5**, (1971), pp. 3-14.
- ROSENFELD, L.: "Niels Bohr's contribution to Epistemology". Physics Today, **16**, nº 10, (1963), pp.47-54.
- ROSENFELD, L.: "The Epistemological conflict between Einstein and Bohr". Zeitschrift für Physik, **171**, (1963), pp.242-245.
- ROSENFELD, L.: "Men And Ideas in the History of Atomic Radiation in Space and Time". Archive for History of Exact Sciences, **7**, (1971).
- SÁNCHEZ RON, J.M.: "Popper y el argumento de Einstein-Podolsky-Rossen". Teorema. Vol. XIV, nº1-2, (1987), pp. 115-123.
- SANTOS, E.: "The possibility of an interpretation of quantum mechanics that maintains realism and causality". Cuadernos de Ontología, **1**, (2000), pp. 107-114.
- SAUNDERS, S.: "Decoherence, Relative States, and Evolutionary Adaptation". Foundations of Physics, **23**, (1993), pp. 1553-1585.

- SHAPIRO, S.: "Mathematics and Reality". Philosophy of Science, **50**, (1983), pp.523-548.
- SHIMONY, A.: "Realidad del mundo cuántico". Investigación y ciencia. (Edición española de Scientific American), Temas 10, (1998), pp.28-35.
- STAIRS, A.: "Quantum Logic, Realism and Value Definiteness". Philosophy of Science, **50**, (1983), pp.592 ff.
- STAPP, H.P.: "The Copenhagen Interpretation". American Journal of Physics, **40**, (1972), pp. 1098-1116.
- STYBE, S.E.: "Niels Trescow (1751-1833) A Danish Neoplatonist". Danish Yearbook of Philosophy, **13**, (1976), pp. 29-47.
- TEGMARK, M.: "Apparent Wave Function Colappse Caused by Scattering". Foundations of Physics Letters, **6**, (1993), pp. 571-590.
- TELLER, P.: "Quantum Mechanics and the Nature of Continuous Physical Quantities". Journal of Philosophy, **76**, (1979), pp. 345-361.
- TELLER, P.: "The Projection Postulate as a Fortuitous Approximation". Philosophy of Science, **50**, (1983).
- TURNER, J.: "Maxwell On the Method of Physical Analogy". British Journal of the Philosophy of Science, **6**, (1955), pp. 226-238.
- UFFINK, J.B.M./HILGEOORD, J.: "Uncertainty principle and uncertainty relations". Foundations of Physic, vol. **15**, (1985), pp. 925-944.
- VALENTINI, A.: "Signal Locality, Uncertainty, and the Subquantum H-Theorem". Physics Letters A, **156**, (1991), pp.5-11; **158**, (1991), pp. 1-8.
- VIGIER, J.P., Lett. Nuovo Cimento, vol. **24**, (1979).
- VOLLMER, G.: "Why does mathematics fit nature? The problem of application". Cuadernos de Ontología, **1**, (2000), pp. 251-260.
- WEIDLICH, W.: "Problems of the Quantum Theory of Measurement". Zeitschrift für Physik, **205**, (1967), pp. 119-220.
- WESSELS, L.: "The *EPR* Argument: a Post-Mortem". Philosophical Studies, **40**, (1981), pp. 3-30.
- WILKERSON, T.E.: "Transcendental Argumetns Revisited". Kant-Studien, **66**, (1975), pp. 102-115.
- WITT-HANSEN, J.: "Leibniz, Hoffding and the *Ekliptika* Circle". Danish Yearbook of Philosophy, **17**, (1980), pp. 31-58.
- WOLFF, F.: "Une physique matérialiste est-elle soluble dans l'indéterminisme?". Cuadernos de Ontología, **1**, (2000), pp. 283-294.

- YAM, P.: "La frontera entre lo cuántico y lo clásico". Investigación y ciencia. (Edición española de Scientific American), Temas 10, (1998), pp.84-90.
- YOUNG, J.M.: "Kant on the Construction of Arithmetical Concepts". Kant Studien, **73**, (1982), pp.17-46.
- ZEILINGER, A.: "The Quantum Centennial". Nature, **408**, (2000), pp.639-641.
- ZURECK, W.H.: "Decoherence and the Transition from Quantum to Classical". Physics Today, **44**, 10, (1991), pp. 36-44.