

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE FILOSOFIA
Departamento de Lógica y Filosofía de la Ciencia



**MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL
CONOCIMIENTO**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR
PRESENTADA POR
David Calvo Vélez

Bajo la dirección del doctor:
Andrés Rivadulla Rodríguez

Madrid, 2006

ISBN: 978-84-669-2908-0

DAVID CALVO VÉLEZ

TESIS DOCTORAL

**MODELOS TEÓRICOS
Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO**

DIRECTOR DE TESIS

ANDRÉS RIVADULLA RODRÍGUEZ

DEPARTAMENTO DE LÓGICA Y FILOSOFÍA DE LA CIENCIA

FACULTAD DE FILOSOFÍA

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

“Nur so nämlich können wir der Ungerechtigkeit, oder Leere unserer Behauptungen entgehen, indem wir das Vorbild als das, was es ist, als Vergleichsobjekt -sozusagen als Maßstab -hinstellen; und nicht als Vorurteil, dem die Wirklichkeit entsprechen müsse. (Der Dogmatismus, in den wir beim Philosophieren so leicht verfallen.)”

“Sólo podemos, pues, salir al paso de la injusticia o vaciedad de nuestras aserciones exponiendo el modelo como lo que es, como objeto de comparación -como, por así decirlo, una regla de medir; y no como prejuicio al que la realidad tiene que corresponder. (El dogmatismo en el que tan fácilmente caemos al filosofar.)”

WITTGENSTEIN, Investigaciones filosóficas, § 131, traducción de Alfonso García Suárez y Ulises Moulines.

ÍNDICE

<u>AGRADECIMIENTOS</u>	9
<u>RESUMEN</u>	11
<u>INTRODUCCIÓN</u>	17
<i>1. Modelos científicos</i>	17
<i>2. Predicción, descripción, explicación</i>	21
<i>3. Planteamiento general</i>	25
<u>I. HACIA UNA ELUCIDACIÓN DE LA PALABRA “MODELO”</u>	33
<i>1.0. Introducción</i>	33
<i>1.1. Modelos en Filosofía de la Ciencia</i>	35
<i>1.2. Teoría de Modelos</i>	41
<i>1.3. Críticas al reduccionismo lógico</i>	46
<i>1.4. El proceso de modelización científica</i>	55
<i>1.5. El modelo como síntesis explicativa</i>	62
<i>1.6. Recapitulación</i>	71
<u>II. EL DEBATE REALISMO VERSUS INSTRUMENTALISMO</u>	75

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

<i>2.0. Introducción</i>	75
<i>2.1. Las unidades computables de Platón</i>	76
<i>2.2. Justificaciones empíricas y teóricas</i>	81
<i>2.3. Un ejemplo de modelo astronómico</i>	93
<i>2.4. Sistemas alternativos de representación</i>	105
<i>2.5. Recapitulación</i>	112
<u>III. MODELOS DE MECÁNICA CLÁSICA</u>	115
<i>3.0. Introducción</i>	115
<i>3.1. Un ejemplo de modelo newtoniano</i>	114
<i>3.2. Recapitulación</i>	129
<u>IV. MODELOS ESTRUCTURALISTAS</u>	133
<i>4.0. Introducción</i>	133
<i>4.1. La estructura de los núcleos teóricos</i>	135
<i>4.2. Crítica del isomorfismo (I)</i>	141
<i>4.3. Relativismo e inconmensurabilidad</i>	162
<i>4.4. Recapitulación</i>	173
<u>V. EL PAPEL DE LAS ANALOGÍAS EN FÍSICA</u>	177
<i>5.0. Introducción</i>	177
<i>5.1. Analogías entre sistemas físicos</i>	178

ÍNDICE

<i>5.2. Límites de los modelos icónicos</i>	183
<i>5.3. Crítica de la similaridad (I)</i>	194
<i>5.4. Recapitulación</i>	203
<u>VI. MODELOS SEMÁNTICOS</u>	207
<i>6.0. Introducción</i>	207
<i>6.1. Interpretaciones semánticas: Suppe</i>	209
<i>6.2. El empirismo constructivo de van Fraassen</i>	216
6.2.1. Crítica de la distinción teórico-observable	221
6.2.2. Crítica del isomorfismo (II)	229
<i>6.3. Modelos cognitivos de Giere</i>	239
<i>6.4. Crítica de la similaridad (II)</i>	247
<i>6.5. Recapitulación</i>	259
<u>VII. ANÁLISIS PRAGMÁTICOS DE LA REPRESENTACIÓN</u>	263
<i>7.0. Introducción</i>	263
<i>7.1. Representación e intervención</i>	265
<i>7.2. Objeciones al realismo experimental</i>	274
<i>7.3. Descripciones fenomenológicas</i>	284
<i>7.4. En defensa de las leyes fundamentales</i>	296
<i>7.5. Recapitulación</i>	307

<u>VIII. EL INSTRUMENTALISMO DE LOS MODELOS TEÓRICOS</u>	313
<i>8.0. Introducción</i>	313
<i>8.1. La equivalencia metodológica entre leyes y reglas de inferencia</i>	315
<i>8.2. Verdad y éxito empírico</i>	323
<i>8.3. Subdeterminación empírica y casos límites</i>	328
<i>8.4. Modelos de Física Nuclear</i>	340
<i>8.5. Racionalidad científica: epistemología y metodología</i>	349
<i>8.6. Recapitulación</i>	360
<u>CONCLUSIONES</u>	365
<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	383

AGRADECIMIENTOS

En septiembre de 1999, recién licenciado en Filosofía por la UNED, me dirigí al Departamento de Lógica y Filosofía de la Ciencia de la Universidad Complutense de Madrid, para hablar con el Profesor Andrés Rivadulla, de quien había leído buena parte de su obra durante la carrera, con el fin de solicitarle que dirigiera mi tesis doctoral sobre modelos teóricos en Física, acerca de la relación que estas construcciones científicas guardan con los fenómenos de la naturaleza que supuestamente representan, que aceptó amablemente.

En enero de 2000 me fue concedida una Beca Doctoral de la Fundación Caja Madrid, gracias a la cual pude dedicarme exclusivamente a la preparación de los cursos del primer año de doctorado, mientras comenzaba a estudiar las implicaciones filosóficas de las epistemologías realista e instrumentalista. Vaya por delante mi agradecimiento a la Fundación Caja Madrid.

A partir de septiembre de 2000, la Comunidad de Madrid me dio la oportunidad de continuar mis estudios durante cuatro años más con una beca de Formación del Personal Investigador (FPI), sin la cual hubiera sido imposible profundizar sobre el tema, y por cuya concesión estoy profundamente agradecido a la CAM. La beca, además, incluía una serie de ayudas anuales para visitar Universidades extranjeras, lo que me permitió, en un primer momento, y gracias a la amable aceptación del Profesor Colin Howson, a realizar una estancia breve de investigación en *The London School of Economics*, de la que no tengo más que buenos recuerdos.

En octubre de 2002 tuve la oportunidad de visitar durante tres meses al Profesor Gonzalo Munévar, Catedrático en *Lawrence Technological University* (EEUU), donde, dentro del ambiente exquisito y cordial del Departamento de Humanidades, pudimos discutir en multitud de conversaciones sobre la base objetiva de la realidad y el relati-

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

vismo implícito en la ciencia. Agradezco al Profesor Munévar que compartiera conmigo sus argumentos e ideas, así como la amistad que siempre me profesó.

En enero de 2003 pasé a formar parte del Proyecto de Investigación del Ministerio de Educación y Ciencia “Modelos Teóricos en Física”, BFF2002-10244, con el Profesor Rivadulla como investigador principal, dentro del cual se inscribe esta tesis doctoral. El Proyecto me ha permitido asistir y contribuir con comunicaciones en distintos Congresos, y ha facilitado en buena medida mi labor de investigación. Agradezco al Ministerio su ayuda prestada durante estos tres años.

De mi estancia (agosto - octubre 2003) en la *Università degli studi di Padova*, junto al Profesor Giovanni Boniolo, aprendí a valorar el papel de los modelos nucleares, como apuestas provisionales para salvar los fenómenos en determinados dominios, mientras que reflexionaba sobre el papel de las teorías en el debate realismo-instrumentalismo. Agradezco al Profesor Boniolo sus comentarios, su amabilidad y la atención que me dispensó durante aquellos meses, en los que disfruté de un excelente ambiente para la investigación.

Por encima de todo, no tengo más que agradecimientos para la labor desarrollada durante estos años por el Profesor Rivadulla: su claridad de ideas, sus conocimientos científicos y filosóficos, su atención desinteresada, comprensión y paciencia en los momentos difíciles, son los que, en definitiva, han hecho posible esta tesis, fruto del esfuerzo y trabajo de estos años, durante los cuales me he casado y he tenido una hija. A mi director de tesis, a mi mujer, a mis padres y a mi pequeña Elsa dedico lo que estas páginas pudieran contener de meritorio.

Reitero mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones, públicas y privadas, que han hecho posible la realización de esta tesis doctoral, mientras que expreso mi deseo de seguir colaborando con ellos en un futuro próximo.

RESUMEN

Esta tesis doctoral es una investigación sobre la construcción, utilidad y justificación de los modelos teóricos utilizados en Física. Se analizan las posibles relaciones que el modelo guarda con la realidad que trata de representar, y con los principios teóricos que constituyen su fundamento. Al mismo tiempo, se ofrece un estudio de la racionalidad científica en el marco de la discusión entre realistas e instrumentalistas, en particular acerca de la posibilidad de que el progreso científico se aproxime gradualmente hacia la verdad.

Dentro de esta investigación general, los objetivos son los siguientes:

- ❑ Investigar la naturaleza de la relación existente entre el modelo teórico y la realidad que presuntamente representa, rechazando, por un lado, que el modelo sea una copia, réplica o imitación de la realidad, y por otro, que sea una ficción construida a partir de hipótesis arbitrarias.
- ❑ Analizar la neutralidad y objetividad tanto de los enunciados teóricos como de los enunciados de observación, mediante la crítica de cualquier distinción infundada en el interior de las teorías o modelos, como pueda ser la separación entre términos teóricos y observables, conceptos empíricos y abstractos, entidades observables e inobservables, o, en general, la presencia de una parte explicativa separada de la parte descriptiva.
- ❑ Mostrar que el problema de subdeterminación empírica se resuelve cuando consideramos la doble justificación, empírica y teórica, de los modelos científicos. Pa-

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

ralelamente, se trata de demostrar que el rechazo de la subdeterminación no tiene por qué significar un apoyo al realismo, y que es una exigencia de la racionalidad científica, entendida como un proceso de diversificación y unificación de las distintas áreas y fenómenos.

- Justificar el paso de la verdad como adecuación a la verdad como precisión, sin que ello signifique que el progreso científico se acerque gradualmente hacia la verdad absoluta, entendida como una meta que mostraría el sistema último de la realidad y donde la ciencia se detendría.

Para alcanzar estos objetivos se desarrolla la siguiente metodología:

1. En primer lugar, distingo entre el modelo como realización de una teoría y el modelo como representación de un fenómeno. La primera noción se utiliza en ciencias formales, mientras que la segunda se emplea en las ciencias empíricas. A través de la Teoría de Modelos [Tarski (1956)], muestro los límites que un cálculo axiomático interpretado tiene para subsumir las relaciones elementales de equivalencia entre sistemas que se dan dentro de la Física, así como para traducir y derivar la mayoría de las leyes científicas. También destaco, por otro lado, que el ajuste entre un modelo empírico y los datos experimentales nunca es total, a diferencia de los modelos puramente matemáticos. Manifiesto mi preferencia por la noción de modelo como representación (o modelo teórico), como un esquema básico de comportamiento que un científico construye a partir de un conjunto de enunciados teóricos y de observación considerados verdaderos. A continuación, me detengo en lo que considero lo fundamental del modelo: su capacidad deductiva para inferir una serie de conclusiones, que pueden ir desde medidas hasta teorías, pasando por fórmulas empíricas, hipótesis y leyes de distinta generalidad. El modelo es una síntesis explicativa, un *explanans* más o menos acertado, cuya validez o utilidad se mide por su habilidad para calcular una serie de enunciados que se consideran verdaderos.
2. En segundo lugar, con ayuda de un modelo astronómico, defiendo que un modelo teórico puede construirse a partir de hipótesis relativamente aisladas que no se de-

RESUMEN

ducen directamente del conjunto de enunciados teóricos fundamentales que una comunidad científica, en una determinada época, considera verdaderos. En este caso, el modelo es más o menos útil según su capacidad deductiva para calcular una serie de medidas que conforman el *explanandum*, el cual constituye un conjunto de enunciados de observación considerados verdaderos para el que se busca una función matemática que sea capaz (más o menos) de generarlos. La comparación entre el modelo y la realidad sólo se efectúa entre predicciones y medidas, y nunca es perfecta, sino que resulta más o menos aceptable según la tolerancia permitida por el científico, y de acuerdo al problema particular que se trate de resolver.

3. A continuación deduzco un modelo del movimiento de un proyectil directamente a partir de la teoría de Newton, con ayuda de una serie de simplificaciones, suposiciones e hipótesis que no forman parte de la teoría, y que varían según la precisión que se le exige al modelo. Aunque estas simplificaciones no puedan ser axiomatizadas a través de un cálculo interpretado, ni tampoco derivadas matemáticamente utilizando la teoría de límites o sucesiones, las relaciones entre los distintos modelos son fundamentalmente deductivas, de manera que hay modelos más justificados que otros, de acuerdo con su nivel de generalidad y las premisas de las que parten, puesto que no todas las simplificaciones arrastran el mismo grado de error. Una vez que he distinguido, dentro del lenguaje científico, entre modelos justificados empíricamente y modelos justificados empírica y teóricamente, establezco un diálogo con las principales corrientes de la racionalidad científica, y con las distintas nociones de la palabra “modelo” que se utilizan en Filosofía de la Ciencia.
4. En el capítulo dedicado a los modelos estructuralistas [Sneed (1971), Stegmüller (1981)], critico que las estructuras teóricas puedan llegar a ser en algún momento isomórficas con las de la realidad. Mis argumentos y ejemplos muestran que la naturaleza no es una estructura algebraica con sus elementos y operaciones definidos, y que la realidad puede ser esquematizada extensionalmente de múltiples maneras, todas ellas compatibles y complementarias entre sí, sin que ninguno de estos modelos refleje por sí solo la estructura de la realidad. Sin embargo, este rela-

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

tivismo a la hora de modelizar el mundo no supone aceptar la “incommensurabilidad” de los conceptos científicos fundamentales, ni que los modelos sean ficciones cuyas hipótesis sean escogidas de modo completamente arbitrario.

5. Mis objeciones fundamentales al isomorfismo son aplicadas a la noción de similitud [Campbell (1957), Hesse (1966), Black (1966)], puesto que también supone una correspondencia entre sistemas reales y sistemas representativos, de los que pudiera señalarse dónde se parecen y dónde se diferencian. Pero las analogías sólo tienen sentido entre representaciones, no entre la representación y el mundo, y tienen su importancia dentro del contexto de descubrimiento (donde permiten unificar las distintas áreas de la investigación), y no en la justificación. De modo general, me opongo a que una teoría pueda en algún momento dar un listado “extensivo” exhaustivo o completo de sus modelos, aplicaciones, analogías o grados de similitud.

6. Dentro del capítulo dedicado a los modelos semánticos [Suppe (1990), van Fraassen (1996), Giere 1988)], en lo que constituye mi segunda crítica del isomorfismo y de la similitud, destaco que ni siquiera en los casos más sencillos los modelos son copias abstractas del mundo, ni resultan semejantes en algunos aspectos. Un modelo es una fórmula matemática que computa (más o menos) una serie de medidas consideradas verdaderas al tiempo que predice otra serie de medidas, algunas de las cuales podrán ser comprobadas por la ciencia, mientras que otras no. La similitud es reducible al grado de aceptabilidad porque en lo único que se parecen nuestra representación y la realidad es en el mayor o menor de grado de ajuste que las predicciones muestran respecto de las medidas efectivas. Es decir, la similitud es un isomorfismo camuflado, que supone que las explicaciones más precisas “se parecen más” a la realidad que las anteriores. Por otra parte, critico la tesis de van Fraassen de que la ciencia designa como “inobservables” ciertas partes de su “imagen”. Mi argumentación trata de mostrar que el predicado “inobservable” no tiene ningún sentido dentro del lenguaje de la ciencia, ni siquiera cuando se postulan entidades para explicar ciertos resultados experimentales. Lo observable, en Física, es lo que puede experimentarse, detectarse, medirse y registrarse, sin que haya ninguna diferencia cualitativa entre “ver directamente” y “ver a través de

RESUMEN

un instrumento”, y sin que las limitaciones de nuestros sentidos impongan ningún límite a la observabilidad.

7. Posteriormente, en mi estudio sobre los análisis pragmáticos de la representación [Hacking (1996), Cartwright (2001)], destaco que todas las leyes son ecuaciones que describen, predicen y explican, y que el mayor o menor grado de abstracción de un modelo tiene que ver con su alcance, y no con su mayor o menor cercanía a la realidad. Tan empíricas son, en este sentido, las leyes más abstractas de la Termodinámica como las leyes de menor nivel, que en todo caso se ven explicadas, precisadas y fundamentadas por las teorías más generales. Defiendo que la unificación a partir de leyes más fundamentales no es un mero resumen del contenido empírico de las leyes que quedan por debajo, sino que va mucho más allá a la hora de predecir nuevos resultados y dirigir la investigación posterior, por lo que considero que el progreso experimental es inseparable del progreso teórico. También defiendo que no es necesario añadir ningún causalismo a las leyes científicas, ya que éstas son, de por sí, causales, en el sentido de que suponen una relación de proporcionalidad entre magnitudes físicas.

8. En el siguiente capítulo, dentro del instrumentalismo de los modelos teóricos contemporáneos [Rivadulla (2004), Boniolo (2004)], afirmo que no hay ninguna diferencia metodológica entre considerar que una ley es un esquema de inferencia o bien una verdad dentro de un sistema de axiomas; lo importante es afirmar la verdad de la ley, desde un punto de vista lógico, aunque sea de manera transitoria, para poder calcular deductivamente nuevos teoremas y datos experimentales. Concluyo que la verdad, en ciencia, es una convención, un “tener por verdadero”, hasta que se demuestre lo contrario y sea necesario una mayor precisión. A continuación, analizo la validez limitada y provisional de los modelos nucleares, contruidos a partir de las más variadas hipótesis, al tiempo que destaco que no todas las suposiciones están igual de justificadas, y que se trabaja para mejorar, precisar y unificar los modelos. Lo ideal, en cualquier caso, es lograr un equilibrio entre rigor teórico y el cálculo, que permita la predicción sin que se cometan errores fundamentales. Pero las contradicciones no conviven pacíficamente dentro de la ciencia, y no tiene sentido suponer la existencia de departamentos estancos o dominios

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

condenados a tener las mismas leyes para siempre. En este sentido, afirmo que la subdeterminación empírica desaparece con mi tesis de la doble justificación, empírica y teórica, del modelo, al aumentar la precisión de las medidas o al ampliar el alcance donde se da la igualdad empírica hacia dominios más generales. Por último, defiendo que la racionalidad científica es un doble proceso de sistematización de lo real; por un lado, la unificación del conocimiento en fórmulas más generales; por el otro, la diversificación mediante la investigación en nuevos campos. En todo caso, se trata de articular (no amontonar) lo que ya se conoce a partir de las nuevas informaciones que se van descubriendo. La verdad es una cuestión de precisión, y los esquemas científicos, mediante los cuales reconstruimos racionalmente el mundo a partir de una serie de medidas, pueden cambiar y mejorarse, sin que ello suponga un mayor acercamiento a la verdad.

En suma, esta tesis doctoral defiende que un modelo teórico es una síntesis de un fenómeno, entendida como una reconstrucción racional de la información disponible, como un principio explicativo de la realidad observable, como la expresión matemática más breve y exacta que describe lo que hasta la fecha se conoce de un determinado fenómeno, construida a partir de una serie de ecuaciones aceptadas, y cuya utilidad radica en la predicción de nuevos aspectos y medidas de la realidad.

INTRODUCCIÓN

1. Modelos científicos

La noción de modelo constituye uno de los temas centrales de la Filosofía actual de la Ciencia; qué sea un modelo, para qué se utiliza, cuáles son sus límites y su alcance, son preguntas imprescindibles para una epistemología científica que, como disciplina empírica, se ocupe del lenguaje de la ciencia, de sus productos y sus desarrollos, de su lógica interna y de su metodología.

El motivo de esta importancia es la utilización por parte de la ciencia de todo tipo de modelos para representar fenómenos de muy distinta naturaleza, en un intento por descubrir y comprender desde un punto de vista racional las regularidades con las que se nos presenta el mundo. Los modelos son hoy en día una herramienta fundamental de análisis, descripción y predicción que la ciencia dispone para llevar a cabo la sistematización, control y comprensión de los aspectos más relevantes de la realidad física y social.

En Biología, por ejemplo, históricamente, los trabajos de Weinberg, Hardy, Fisher y Morgan, entre otros, que buscaban la síntesis mendeliana con la teoría de la evolución de Darwin, mediante modelos para la interacción de dominancia, mutación y cruzamiento selectivo, contribuyeron al desarrollo de la genética de poblaciones y fundaron la Biometría. En la actualidad, para el estudio de cepas bacterianas resistentes a los medicamentos se utilizan modelos estadísticos de reproducción basados en la producción aleatoria de organismos mutantes que se convierten en dominantes por selección natural¹.

¹ También pueden considerarse como modelos de sistemas biológicos las representaciones simplificadas de lucha por la vida de Vito Volterra mediante ecuaciones diferenciales *predador-presa*, o los

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

En Economía, se busca la representación simplificada y completa de informaciones relativas a un sistema económico. Los modelos expresan las relaciones entre las variables consideradas significativas para el funcionamiento del sistema. En Econometría, se parte de unos modelos uniecuacionales (modelo básico de regresión lineal, modelo de regresión generalizado, modelo de regresión dinámica) para ir creciendo en complejidad estadística a través de modelos multiecuacionales con los que explicar, predecir o estudiar el comportamiento de los sistemas económicos². Los modelos deterministas *input - output* de Leontief, los modelos de dinámica de sistemas y los de investigación operativa (referidos a la programación, *stocks* y transporte), así como los modelos de decisión y una gran parte de la Teoría de Juegos pueden ser considerados como modelos racionales de gestión y control de la información que modelizan situaciones a partir de hipótesis o premisas aceptadas sobre la naturaleza económica de los fenómenos.

En Lingüística se parte de los elementos mínimos de significado (fonemas, morfemas) para la construcción de los distintos niveles en los que se estructuran las lenguas naturales. La teoría de los modelos del lenguaje busca establecer una tipología lingüística que permita clasificar los diversos sistemas sémicos. Para ello, se describen las lenguas naturales en función de las gramáticas que los generan y se investigan los modelos gramaticales que generan el mayor número de frases registradas. Dos modelos se consideran equivalentes si generan las mismas oraciones. La lengua de estados finitos, la gramática de constituyentes inmediatos, o la gramática generativa transformacional, son una serie de modelos elaborados por Chomsky (1985) tales que cada modelo sucesivo produce las frases del modelo anterior.

En Química la noción de modelo es ampliamente utilizada. Los distintos niveles de organización de la materia se sistematizan en modelos de partículas submicroscópicas (protones, neutrones y electrones), modelos de átomos, moléculas y redes cristalinas. Las estructuras superiores e inferiores se relacionan entre sí influyendo en las pro-

modelos de competitividad de Verhulst entre individuos de la misma especie utilizando *ecuaciones logísticas*.

² Véase Pulido (1989) para el desarrollo de veintidós modelos aplicados a fenómenos tan distintos como el desempleo, la cotización bursátil, el número de viviendas construidas, la inversión, etc., así como los principales descubrimientos de la Econometría sobre estadística, técnicas de computación y construcción de macromodelos.

INTRODUCCIÓN

propiedades observadas de las sustancias. Las descripciones de estos niveles son fundamentales para la comprensión y elaboración de un cuadro completo de los sistemas orgánicos e inorgánicos. Estas descripciones son modelos de la realidad que resumen y clasifican la información experimental que hasta la fecha se dispone sobre los distintos fenómenos. Los conceptos de gases, sólidos y líquidos ideales, las geometrías moleculares basadas en las estructuras de Lewis, las configuraciones electrónicas, los tipos de enlace, los modelos de reacciones en cinética, termodinámica y equilibrio químico, son ejemplos de idealizaciones que permiten clasificar y explicar las propiedades observables del mundo físico y profundizar en nuestro conocimiento de la naturaleza³.

Finalmente, en Física, los modelos son parte indispensable de la explicación científica. Baste recordar que los modelos geométricos utilizados en Astronomía desde Platón hasta Kepler tienen su continuidad, dentro de la Edad Moderna, en la Mecánica racional de los siglos XVI y XVII, precursora en la utilización de modelos sencillos de la realidad que permitieran la construcción racional de los fenómenos observados a partir de su formulación matemática y analítica. El péndulo ideal, constituido por un punto donde se concentra la masa del cuerpo, suspendido de un hilo sin masa, flexible, inextensible y con oscilaciones lo suficientemente pequeñas para que el seno del ángulo que forma con el eje vertical se confunda con el ángulo, permite deducir la dependencia matemática del período respecto a la longitud del hilo y la aceleración de la gravedad. Esta fórmula deducida a partir del modelo puede comprobarse en la realidad mediante la experimentación, y permite (en caso de que los resultados de la observación concuerden con los esperados) elevar las hipótesis al rango de leyes.

La Mecánica parte de la clasificación de los movimientos según la velocidad y aceleración de los puntos materiales, y reduce el problema de un cuerpo rígido (condiciones de ligadura) a la cinemática del punto. Conceptos como centro de gravedad, cuerpos deformables e indeformables, o ángulos de Euler, suponen las nociones de sucesión, límite y función, como parte del aparato matemático imprescindible para la obtención de teoremas como el de Charles o las ecuaciones de los ejes instantáneos de rotación. En Dinámica se introduce el concepto de partícula como punto dotado de masa, sin dimensiones, para estudiar las transformaciones de Galileo, el principio de invarianza o las leyes de Newton, válidas cuando se aplican en un sistema de referencia no

³ En Russell & Larena (1988) hay un estudio detallado de los modelos más generales de la Química.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

acelerado. Los movimientos complejos se descomponen mediante el análisis en movimientos más simples de los que se conocen sus ecuaciones precisas. Se avanza desde lo más sencillo y fundamental hasta los sistemas de partículas más complejos, en una sucesión de modelos cada vez más elaborados hasta su aplicación, con ayuda de la ley de gravitación universal de Newton, al movimiento de los planetas, satélites artificiales, misiles, proyectiles, fuerzas elásticas, u osciladores armónicos.

Sería imposible enumerar la cantidad de situaciones donde se hace uso de la palabra “modelo” en otras disciplinas de la Física como método para la sistematización de los fenómenos. En campos aparentemente tan alejados como la Acústica, la Hidrodinámica, los movimientos periódicos y vibratorios, la Termodinámica, la Electricidad, el Magnetismo, la Óptica o los fenómenos radiactivos, se han descubierto y se investigan la similitud de ciertos fenómenos independientes representados por modelos formalmente idénticos. Esta analogía permite representar materiales diversos por un mismo conjunto de ecuaciones que unifican los datos experimentales en una serie de modelos básicos que constituyen los pilares de la ciencia.

Otras ciencias fundamentales y aplicadas, como la Antropología, la Psicología, la Inteligencia Artificial o la Ecología, utilizan modelos para reflejar y comparar las organizaciones sociales y políticas, los sistemas de distribución energética alimentaria (calorías por tiempo de trabajo), el crecimiento demográfico, las diferentes pautas de parentesco y filiación (unilineal, bilineal, ambilineal, patrilineal), los ecosistemas, modelos de comportamiento humano bajo una serie de estímulos, o modelos de reglas para la deducción de enunciados basados en Teoría de Computación y lógicas alternativas. En definitiva, los modelos están presentes en la mayoría de las disciplinas científicas, y pueden considerarse una parte esencial en la metodología particular de cada una de ellas.

En todos los casos, el modelo reduce el fenómeno a sus líneas fundamentales, traduciendo la realidad a un lenguaje lógico y matemático que sirva de soporte estructural para realizar tentativas de explicación y evaluar la eficacia de las hipótesis comprobando *a posteriori* su funcionamiento en la realidad, y escogiendo, de entre los modelos posibles, aquellos que mejor se adapten empíricamente al fenómeno que se estudia.

En muchos dominios de la ciencia, sin embargo, la naturaleza compleja de los fenómenos estudiados, el gran número de variables relevantes o las múltiples interrelaciones entre los aspectos de esa realidad, no permiten más que un modelo probabilístico, a

INTRODUCCIÓN

partir de la recogida de los datos, o bien una serie de modelos empíricos que proporciona solamente relaciones cuantitativas entre las variables.

Aunque la correspondencia con una serie de medidas no sea exacta, el modelo permite acercarnos al comportamiento del fenómeno para ponerlo en correspondencia con otros fenómenos ya conocidos. Los modelos analógicos, aquellos que se fundan en la identidad formal de las ecuaciones en distintos dominios, permiten establecer correspondencias entre magnitudes pertenecientes a fenómenos diversos, y poder así generalizar un mismo método resolutivo para la solución de las ecuaciones⁴.

Los modelos parecen ser sucesivas aproximaciones a los fenómenos, construcciones que se van mejorando o adaptando a partir de la respuesta objetiva que ofrece la realidad. El modelo es válido cuando es capaz de “adecuarse” a la realidad, de “concordar” con ella, aunque en un sentido que todavía está por precisar.

2. Predicción, descripción, explicación

La discusión sobre si los modelos científicos constituyen una imagen fiel, más o menos adecuada a la realidad que representan, o si, por el contrario, son meros instrumentos de cálculo que nos permiten predecir el comportamiento de un fenómeno, limitándose a *salvar las apariencias*, ocupa buena parte de la Filosofía de la Ciencia contemporánea, desde Duhem (1991) hasta Cartwright (2001), pasando por Popper (1994) o van Fraassen (1996).

Dentro de este debate epistemológico, el *realismo* científico piensa que hay una correspondencia entre la estructura de las teorías y modelos científicos con la estructura real del mundo. Un enunciado es verdadero, de acuerdo con Aristóteles (*Metafísica*, Γ, 1011 b 26-8), si se corresponde con la realidad, y falso en caso contrario. Los enunciados científicos son verdaderos si se refieren a hechos que realmente ocurren, a cosas que podemos experimentar y comprobar. Las teorías describen y explican cómo es la realidad de las cosas, cuál es la causa de su comportamiento, su porqué.⁵

⁴ Véase Capítulo V.

⁵ La verdad puede ser definida de muchas maneras: como consistencia con un grupo de enunciados aceptados, como asertabilidad, consenso, simplicidad, *alétheia*... Aquí se tratará la verdad como *corres-*

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Ante la pregunta de Putman (1988), sobre si hay una estructura incorporada en el mundo, el realista respondería afirmativamente, y añadiría que esa estructura es la que la Física trata de reflejar en sus teorías. Lo que la teoría dice acerca del mundo es verdadero, y el éxito de la ciencia se debe precisamente a esta correspondencia entre lenguaje y realidad. La estructura de las teorías, si son verdaderas, existe y se da de modo efectivo en la naturaleza.

Para el realismo, el objetivo de la ciencia es la búsqueda de esa estructura fundamental de la naturaleza que describe y explica su comportamiento. El progreso científico avanza hacia esa teoría última de la realidad⁶, y la historia de la ciencia consiste en la acumulación de verdades objetivas acerca del mundo con independencia del sujeto que lo percibe.

La ciencia nos descubre y explica cómo es el mundo en sí mismo. Los enunciados científicos son leyes que ocurren en la naturaleza, leyes independientes de los medios que usemos para descubrirlas o de las relaciones particulares que se dan entre el científico y el fenómeno objeto de estudio. Como le escribe Einstein a Born en una de sus cartas, “ser es distinto de ser percibido”⁷. El cometido de la ciencia es buscar esa verdad objetiva que existe en la naturaleza, esa estructura última que en definitiva hace posible la percepción particular que un observador tiene de ella. Descubrir cómo son las cosas más allá de lo que aparentan ser, según la epistemología realista, es el impulso fundamental que ha guiado la ciencia desde sus comienzos.

Nuestras teorías son verdaderas; describen cosas que suceden, cosas reales. El éxito de la ciencia se debe a que sus enunciados, eso que nos dicen del mundo, son verdaderos. Los elementos teóricos tienen su correspondencia en el mundo; no son principios arbitrarios, ni ficciones; son algo real. Los enunciados de la Física se refieren al mundo físico, no son construcciones abstractas de mayor o menor utilidad.

pondencia, bien sea entre los planos real y lingüístico, o entre enunciados de predicción y enunciados de observación directa.

⁶ Esto es lo que defiende el *realismo convergente*, en expresión de Laudan (1986).

⁷ La carta está fechada el 15 de septiembre de 1950. En otra carta del 7 de septiembre de 1944 (citado en Deligeorges, ed., 1990, p. 52), Einstein escribe: “Tú crees en un Dios que juega a los dados, y yo en el valor único de las leyes en un universo en el que cada cosa existe objetivamente, el cual intento asir de un modo salvajemente especulativo”.

INTRODUCCIÓN

La ciencia avanza porque los métodos que utiliza para explicar los fenómenos, las teorías, mejoran con el tiempo y se hacen cada vez más precisas y reveladoras. El progreso científico es acumulativo y lineal, en el sentido de que el conocimiento que tenemos del mundo crece en proporción al desarrollo de los instrumentos de medida, que nos descubren hechos que antes no se conocían⁸. Del mismo modo que la Teoría de Newton es superior a las leyes de Galileo y de Kepler, también la Teoría de la Relatividad supone un avance con respecto a la Newton. La nueva teoría recoge o matiza los resultados exclusivamente científicos de las anteriores, por lo que hay un límite entre teorías que nos permite derivar las anteriores y nos asegura que los enunciados científicos de otras épocas sigan permaneciendo en el *corpus* general de la ciencia. El criterio de demarcación entre lo que es ciencia y lo que no es sigue siendo la verdad, no la utilidad. La ciencia es verdadera porque sus enunciados se corresponden con lo que ocurre en el mundo. Lo que no es verdadero, sencillamente, no sucede.

Por su parte, y a diferencia de esta corriente realista, el *instrumentalismo* piensa que la ciencia no explica ni describe el mundo, sino que solamente predice cuál es el comportamiento de los fenómenos bajo una serie de condiciones iniciales, sin que por ello hayamos conocido nada acerca del funcionamiento de la naturaleza. Nosotros no sabemos cómo es el mundo en sí; desconocemos cuál es su esencia. Una cosa es el hecho y otra cosa es la explicación que damos de ese hecho por medio de una teoría. Que esa teoría sea adecuada empíricamente, es decir, que “salve las apariencias”, no significa que sea verdadera.

Las teorías científicas son tan sólo instrumentos que nos permiten predecir y manejarnos cognitivamente con el mundo. Como herramientas, las teorías no son verdaderas ni falsas, sino más o menos útiles o apropiadas. La ciencia se hace esquemas de la realidad, modelos, pero esas imágenes no tienen por qué corresponderse con nada real. Su adecuación empírica, su utilidad, el hecho de que funcionen, no las hace verdaderas. Según Rivadulla (2004, pp. 14, 29): “El éxito en ciencia no es ningún indicador de su verdad”.

Si dos teorías dan cuenta del mismo hecho no podemos, de acuerdo con criterios estrictamente empíricos, decir cuál es mejor, en el sentido de cuál está más próxima a la verdad o cuál resulta más verosímil, por lo que tenemos que utilizar otros criterios no

⁸ Es la llamada *tesis del desarrollo por reducción*, defendida, entre otros, por Nagel (1961).

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

empíricos, como la simplicidad, u otra serie de criterios formales, para decidimos por una de ellas. Los hechos muestran una clara *indeterminación*, según el instrumentalismo, con respecto a las teorías. Un mismo hecho puede ser considerado de muy distinta forma según la teoría y el método que utilicemos. Nuestras teorías no determinan qué es la realidad. Si nuestras teorías fueran verdaderas, la realidad sería de muchas formas distintas, puesto que no hay una única teoría que sea capaz de “explicar” un hecho. Las estructuras implicadas en cada caso son totalmente distintas porque parten de principios diferentes.

El concepto de racionalidad científica que aquí se defiende difiere mucho del que se da en el realismo. El método científico varía según los problemas a los que la ciencia se enfrente, de acuerdo a criterios prácticos o evolutivos, según el contexto donde nos encontremos. El incumplimiento de principios que, según el realismo, guían y fundamentan toda la investigación científica, como el principio de no contradicción, o el principio de no proliferación de teorías, son algo habitual en ciencia, incluso necesarios, para que ésta avance y no se convierta en algo reiterativo y anquilosado. La práctica científica muestra muchos ejemplos donde se usan principios diferentes tomados de teorías incompatibles entre sí.

Las teorías científicas sólo tienen como fin último la predicción, por lo que una buena teoría, una teoría científica, será aquella que sea adecuada empíricamente, aquella que se atenga a los hechos y que sea fructífera respecto de ellos, sin importar cuáles sean los principios generales de los que partan. Como dice Duhem (1991, p. 55), la teoría unifica un conjunto de hechos experimentales que la naturaleza suministra, y nada más. Nuestras teorías científicas son clasificaciones lógicas, criterios racionales con los cuales ordenamos el mundo, pero sin que exista una correspondencia última con nada real. Pretender convertir una clasificación artificial en una natural es dar un salto injustificado entre cuestiones *de dicto* y cuestiones *de facto*, entre lenguaje y lo que ese lenguaje trata de resumir: los hechos que observamos de la naturaleza.

Conviene destacar que la racionalidad científica no se ve mermada en el instrumentalismo, ya que dispone de medios adecuados para la evaluación y elección entre teorías en competencia. Como señala Rivadulla (2004, p. 130), el *balance predictivo*, como “sopesamiento de los poderes predictivos empíricamente contrastados de las teorías competidoras”, asegura la comparación racional entre hipótesis, y permite la susti-

INTRODUCCIÓN

tución de unas herramientas que han perdido buena parte de su utilidad por otras más complejas y eficaces.

3. Planteamiento general

En cualquier caso, y con independencia de la distinción epistemológica entre el realismo y el instrumentalismo, para la formación del modelo son fundamentales los datos empíricos obtenidos a partir de la experiencia. Estos datos (que muchas veces se expresan en forma de tablas y gráficos) indican la manera con la que ciertas variables dependen y se relacionan entre sí. Para ello es preciso suponer que los diversos aspectos de la realidad son reducibles, en última instancia, a un esquema más o menos abstracto que permita recomponer y analizar con más claridad el fenómeno que se estudia. El modelo necesita la elección de variables relevantes, es decir, de conceptos que se refieran primordialmente a los aspectos hipotéticamente fundamentales de la experiencia y que permitan enunciar formulaciones intersubjetivas, “hechos”, enunciados de observación aceptados.

A partir de aquí podemos buscar una ley que se ajuste a los datos experimentales y comprobar la validez de un modelo sometiéndolo a condiciones experimentales. La contrastación con la realidad es en última instancia quien decide la utilidad del modelo, su éxito, hasta el punto de que un modelo inicial puede sufrir todo tipo de modificaciones para adaptarlo al sistema que trata de representar, perfeccionándolo, o ser abandonado y sustituido por otro que parta de principios completamente diferentes.

Aparte del lenguaje común de observación, se necesita la interpretación de los datos por parte de algún tipo de teoría. El modelo tiene una serie de supuestos, hipótesis y leyes que son las que de hecho permiten su construcción. Pero, ¿hasta qué punto un modelo depende de la teoría, tal y como se ha entendido tradicionalmente el concepto de teoría (las grandes teorías explicativas: Mecánica Cuántica, Teoría de la Relatividad, Electromagnetismo, Mecánica Newtoniana), y hasta qué punto es libre de ellas? Éste es el problema de la autonomía de los modelos.

Tradicionalmente, las teorías han desempeñado el papel fundamental para la explicación del mundo físico. El papel relevante de los modelos, cada día más aplicados en todas las ramas de la ciencia, pondría de manifiesto que la modelización del mundo (de la naturaleza, en Física), no sería un aspecto más de la metodología científica, sino

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

un método fundamental con el que la ciencia trabaja actualmente en la elaboración de sus productos, y por el que muchas disciplinas, históricamente, han adquirido el rango de ciencias.

Esta tesis doctoral investigará este papel de los modelos en Física, desde donde trataré de responder a las siguientes cuestiones:

1) ¿Qué es un modelo teórico? ¿Para qué se utiliza? ¿Cómo se construye un modelo? ¿Cuál es su relación con la realidad, con el fenómeno al que trata de representar? ¿Hasta dónde llega su alcance explicativo?

2) ¿Cuál es la diferencia entre un modelo y una teoría? ¿En qué consiste “modelizar” y en qué consiste “teorizar”?

3) Cuando varios modelos son capaces de representar una misma realidad, ¿cuál de ellos se utiliza? ¿Por qué? ¿Qué hace a un modelo más fiable que otro? ¿Qué lo justifica frente a los demás?

Para ello, y con el fin de elucidar la noción de modelo, comenzaré, en el Capítulo I, por recoger los significados que la palabra “modelo” tiene en Filosofía de la Ciencia y en el propio lenguaje científico. Mi primera distinción se basa en el modelo como realización, como ejemplar donde la teoría se ve realizada, tal como se utiliza el concepto en las ciencias formales, y en el modelo como representación o esquema, que predomina en las ciencias empíricas. En segundo lugar, estudiaré el uso del concepto en la llamada “Teoría de Modelos”, iniciada por Tarski (1956), y que tanta influencia ha tenido en Lógica y en Metodología. Después, considero las dificultades que un lenguaje lógico interpretado tiene para traducir los enunciados principales de la Física, y doy una serie de argumentos en contra de semejante posibilidad. A continuación, de modo provisional, hago una exposición de los elementos que considero imprescindibles en la modelización, a la que concibo como un proceso de construcción de la representación de un fenómeno que el científico elabora a partir de unos datos y condiciones experimentales y de un conjunto de hipótesis, con distintos niveles de generalidad. Por último, defiendo que el modelo es un *explanans* a partir del cual obtener deductivamente una serie de enunciados considerados verdaderos, y que van desde datos experimentales, medidas,

INTRODUCCIÓN

leyes e hipótesis de distinta generalidad, e incluso teorías abstractas. El modelo, si realmente es útil, sigue explicando y salvando las apariencias en dominios distintos a aquellos para los que fue creado.

En el Capítulo II, hago una introducción histórica al debate instrumentalismo-realismo en la Grecia clásica y en el Helenismo, a partir de la llamada “pregunta de Platón”, y distingo entre los modelos astronómicos de Eudoxo o Ptolomeo y los modelos físicos de Aristóteles. El debate sobre la elección entre sistemas equivalentes, la verdad o arbitrariedad de los principios y las relaciones entre Geometría y Física, se extiende a lo largo de la Edad Media y va más allá de Copérnico, Galileo y Kepler. Mi contribución pretende mostrar cómo las condiciones matemáticas de los modelos más instrumentales se someten a las necesidades que desde la Física se impone a la representación. Con ayuda de un modelo sencillo de epiciclo y deferente analizo los fines fundamentales que perseguían estos dispositivos computacionales y proporciono una tabla comparativa entre resultados de predicción y observación. Por último, después de considerar algunos patrones de descubrimiento científico, reduzco el debate entre realistas e instrumentalistas a una mayor o menor justificación del modelo en relación con una serie de principios teóricos considerados verdaderos.

De la revolución científica de los siglos XVI y XVII, paso, en el Capítulo III, a apreciar las virtudes de una teoría como la de Newton, donde los modelos se construyen deductivamente a partir de las condiciones del fenómeno particular que se desea estudiar. Aquí defiendo que el modelo está justificado no sólo empírica, sino teóricamente, aunque la serie de correcciones, simplificaciones y suposiciones no puede ser axiomatizada dentro de la teoría, quien sólo proporciona las reglas metodológicas básicas para la formación del modelo.

En el Capítulo IV, a partir de un análisis de la concepción estructuralista de las teorías científicas [Sneed (1971), Stegmüller (1981), Moulines (1982)], establezco una primera crítica al isomorfismo y a su pretensión de que en algún momento pueda establecerse una correspondencia entre las estructuras de la realidad y del modelo. Examino la noción de aplicación biyectiva allí donde tiene sentido, en Matemática, y me pregunto hasta qué punto la naturaleza es una estructura algebraica con sus objetos y operaciones definidos de manera que pudiera constituir un conjunto imagen hasta el cual llevar las flechas desde el conjunto inicial de nuestra representación. Muestro una serie de ejemplos donde las representaciones cambian de número de elementos y operaciones sin que

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

dejen de referirse al mismo fenómeno. La reducción y sustitución de sistemas equivalentes es uno de los métodos fundamentales de la Física que no puede explicar ninguna concepción de la ciencia que pretenda caracterizar “extensionalmente” la realidad, ya que tendríamos muchos modelos isomórficos al mundo, sin que ninguno de ellos reflejara por sí solo la estructura de la realidad. Mi análisis de estos modelos equivalentes, compatibles y complementarios, apoya cierto relativismo de los objetos puesto que la realidad es esquematizable de distintas maneras, sin que de ningún modo afecte a la base objetiva de la representación, la medida de las dimensiones, y sin que sea necesario suponer ningún tipo de “inconmensurabilidad”, idea que critico abiertamente.

El Capítulo V estudia el papel de los sistemas analógicos en Física, y critica la pretensión de Campbell (1957), Hesse (1966) y Black (1966) de que las teorías deban proporcionar modelos analógicos que hagan corresponder la parte puramente teórica con los componentes empíricos de la realidad. Como señalan Duhem (1991) y Hempel (1988), las analogías tienen su utilidad dentro del contexto de descubrimiento, donde unifican el contenido de los distintos dominios mediante la correspondencia entre términos y la identidad formal de las ecuaciones. Doy un ejemplo de sistemas vibratorios representados por una misma ecuación diferencial a través de una tabla de equivalencia, y concluyo que nuestra representación no es comparable a la realidad porque no son cosas similares de las que pueda indicarse los aspectos que comparten y los aspectos en que se diferencian. Mediante una serie de fotografías de una galaxia muestro que el único sentido de la palabra “analogía” es entre modelos, entre representaciones, no entre las estructuras de la realidad y las del modelo. La naturaleza, ni se deja copiar, ni se deja imitar: sólo accedemos al mundo en una serie de medidas, a partir de las cuales reconstruimos la realidad en una representación racional.

Del estudio de los modelos semánticos del Capítulo VI [Suppe (1990), van Fraassen (1996)], destaco que el isomorfismo ni siquiera es posible en los casos más sencillos, donde sólo intervienen, por ejemplo, la posición y la velocidad. Así, critico por medio de un modelo de caída libre la tesis de van Fraassen de que adecuación empírica y verdad coinciden cuando la teoría sólo especifica componentes observables. Más aún, argumento que las teorías científicas no dan ningún “rodeo” a la hora de explicar los fenómenos, y que no puede separarse ninguna parte “observable” de otra “no observable”. Elaboro mi propia noción de observabilidad, basada en la cuantificación de una medida, sin importar el sentido (vista, tacto, etc.) que la realice, ni el aparato de medi-

INTRODUCCIÓN

ción utilizado, y definiendo que el modelo hace mucho más que resumir un conjunto de datos experimentales, ya que es capaz de predecir toda una serie potencialmente infinita de nuevas mediciones. Del análisis de Giere (1988) critico fundamentalmente la idea de que los modelos son similares al mundo en alguno de sus aspectos, y defino la noción de similaridad como un isomorfismo camuflado, que lo único que hace es indicar que la correspondencia entre medidas y predicciones no es exacta ni completa. Pero no hace falta decir que el modelo y el mundo se “parecen” para suponer que las mejores explicaciones son más precisas que las anteriores, por lo que concluyo que el isomorfismo y la similaridad son reducibles al grado de aceptabilidad empírica, al tiempo que definiendo que el modelo es una síntesis de la realidad, como forma de ir más allá de los datos experimentales conocidos.

El Capítulo VII estudia el papel de las leyes fundamentales en la investigación de nuevos campos a partir de la crítica que Cartwright (1991, 2001) y Hacking (1996) realizan a las grandes teorías explicativas. Por una parte, afirmo que los modelos más abstractos se refieren, directamente, a la realidad, y que el mayor o menor grado de abstracción que una ley muestra se refiere a su mayor o menor alcance, sin que esto signifique que en algún momento lleguen a perder contacto con la realidad. Todas las leyes describen, predicen y explican, sin que haya diferencias cualitativas entre ellas, porque son ecuaciones que ligan dimensiones físicas a partir de las mismas operaciones. También definiendo que hay modelos más justificados que otros, de acuerdo con una jerarquía deductiva donde no todas las leyes son de la misma importancia, a la hora, por ejemplo, de corregir los principios teóricos que sustentan el modelo ante un desacuerdo. La unificación, en cualquier caso, es un componente esencial de la racionalidad científica, y no sólo consiste en resumir u organizar el contenido empírico de las leyes de bajo nivel, sino que constituye una síntesis sin la cual sería imposible avanzar en nuevos dominios. Por todo ello, rechazaré la distinción entre un progreso teórico y otro experimental o empírico, y los consideraré parte fundamental del mismo proceso de sistematización del conocimiento.

En el Capítulo VIII, con ayuda del instrumentalismo de Rivadulla (2004, 2002) y del estudio de los modelos nucleares [Boniolo (2002, 2003)], afirmo que es indiferente considerar las leyes científicas como reglas de inferencia o como verdades de un sistema teórico; lo importante es afirmar la verdad de la ley, esto es, considerarla como premisa, aunque sea de modo provisional, como forma de obtener pautas deductivas que

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

permitan avanzar en busca de nuevos teoremas y datos experimentales que podrán ser comprobados posteriormente. Además, rechazo la existencia de “límites clásicos” entre teorías a partir de la noción matemática de límite o teoría de sucesiones, ya que las constantes físicas como la velocidad de la luz o la constante de Planck no tienden a nada que no sea su valor, y afirmo que la “subdeterminación empírica” desaparece cuando ampliamos el alcance o la precisión de las medidas, dándose en casos relativamente aislados, especialmente en la investigación puntera de fenómenos como los nucleares. En estos casos, admito que es imprescindible la utilización de modelos “fenomenológicos”, contruidos a partir de hipótesis provisionales que simplifican las ecuaciones y de una validez limitada; pero también considero que las contradicciones no conviven pacíficamente y que se busca la unificación en teorías sistemáticas. En la última parte de este capítulo, afirmo que lo que se “confirma” o “verifica” es el valor de verdad, convencionalmente aceptado, de la ley; es decir, se confirma la verdad supuesta de los principios teóricos que conforman el modelo, en caso de que siga funcionando con precisión en su aplicación a los nuevos fenómenos. También defiendo, contra el falsacionismo, que ni la verdad ni la falsedad son predicados absolutos dentro del lenguaje de la Física, sino que hacen referencia a la mayor o menor utilidad para subsumir enunciados aceptados; es decir, la verdad es una cuestión de precisión, y creer en el progreso científico significa creer en una mayor precisión de los modelos, en un aumento del detalle que permite ver más allá de lo que hasta entonces se conocía. Esto significa que las teorías se funden y unifican a partir de principios y criterios más abstractos. Defiendo, por último, que la ciencia articula, pero no amontona, el conocimiento disponible hasta la fecha, y dejo en suspenso, como cuestión de fe, la creencia de que este conocimiento aumenta gradualmente hacia un sistema final donde la realidad y la ciencia, de repente, se detendrían. Pero un instrumentalista puede creer en la unificación, diversificación y sistematización del conocimiento mediante herramientas, modelos y teorías cada vez más avanzados y sofisticados, como forma más eficiente de articular nuestro conocimiento sobre la naturaleza, sin que ello signifique una mayor aproximación a la verdad total.

En definitiva, se trata de ofrecer una visión racional de la Física a partir del debate epistemológico entre realistas e instrumentalistas, reteniendo lo mejor de cada postura, y demostrando que la característica fundamental de la ciencia es, por una parte, la siste-

INTRODUCCIÓN

matización de los hechos conocidos por medio de modelos contruidos a partir de principios teóricos considerados verdaderos y ordenados deductivamente; y por otra, la búsqueda incesante de fenómenos desconocidos cuya información modifique, readapte o reinterprete esos mismos principios teóricos a partir de otro conjunto de hipótesis.

CAPÍTULO I

HACIA UNA ELUCIDACIÓN DE LA PALABRA “MODELO”

1.0. Introducción

Este primer capítulo trata, en su Sección 1.1: “Modelos en Filosofía de la Ciencia”, de hacerse una idea general de los distintos usos y significados de la palabra “modelo”, tanto en Filosofía como en Física. De entrada, llama la atención la interminable variedad de significados que tiene la palabra tanto en el lenguaje natural como en el filosófico, donde da lugar a numerosos equívocos y vaguedades. Convendría empezar distinguiendo entre el significado de modelo como estructura realizada, tal como se utiliza la palabra en Teoría de Modelos y en las ciencias formales, y la noción de modelo como representación, que predomina en todos los ámbitos de las ciencias empíricas. La pregunta que entonces me formulo es: *¿a qué se debe esta diferencia de significados, a pesar de los intentos que se realizan por reducir todos los significados al uso de la Teoría de Modelos? ¿Es un empecinamiento de los científicos, o hay razones lógicas detrás?*

La Sección 1.2.: “Teoría de Modelos”, se remonta hasta Tarski para introducir los principios generales de la Teoría de Modelos, que concibe semánticamente la teoría como la clase de modelos donde se realiza. La interpretación hace corresponder elementos y relaciones de una estructura lógica con otra estructura donde se cumple lo especificado por la teoría. Su uso parece perfectamente justificado en todas las ramas de la Matemática. Pero, *¿es reducible el lenguaje de la Física a un lenguaje de primer orden? Y de forma más general: ¿puede definirse un fenómeno físico *extensionalmente*, como si fuera un conjunto de números o cualquier otra estructura algebraica?*

La Sección 1.3. “Críticas al reduccionismo lógico”, expone cuatro razones que considero suficientes para descartar que un modelo en Física sea reducible a un modelo

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

puramente matemático. Aparte de que ninguna traducción a un lenguaje lógico nos va a dar la información que por sí sola ofrece una ecuación diferencial, un cálculo axiomático interpretado no sería capaz de derivar la inmensa mayoría de las leyes científicas consideradas verdaderas, porque no es posible introducir en los axiomas todas las suposiciones, simplificaciones y aproximaciones que un científico realiza a la hora de construir un modelo. Además, la adecuación de un modelo no ya con la realidad, sino con una simple serie de medidas, nunca es completa ni exacta, y varía en grados de aceptabilidad, cosa que no ocurre con los conjuntos definidos extensional o intensionalmente dentro del Álgebra. Por si fuera poco, la Teoría de Modelos, al definir la teoría y la realidad a partir de una serie de elementos y las relaciones que se dan entre ellos, no tiene en cuenta la posibilidad de que sistemas con estructuras distintas pueden referirse a un mismo fenómeno físico. El reduccionismo lógico no puede explicar por qué hay sistemas equivalentes desde un punto de vista físico (modelos de una misma realidad, esquematizada de forma distinta), y por qué resultan reemplazables entre sí.

En la Sección 1.4.: “El proceso de modelización científica”, a la vista de las limitaciones de la noción de modelo como realización, propongo caracterizar la modelización como un proceso en el que un científico construye un modelo de un fenómeno a partir de una serie de enunciados de observación aceptados y de un conjunto de enunciados teóricos considerados verdaderos. Defiendo que el modelo es una representación, que admite grados en su justificación y en su alcance, y divido los enunciados teóricos en aquellos que se derivan directamente de las leyes fundamentales, y aquellos que constituyen hipótesis aisladas para salvar las apariencias.

La Sección 1.5.: “El modelo como síntesis explicativa”, defiende que el modelo es un *explanans*, un conjunto de ecuaciones más o menos justificadas que permiten deducir enunciados de observación, modelos de datos, leyes o hipótesis. En principio, el modelo se dice *adecuado* porque es capaz de deducir (dentro de un margen de error) una serie de medidas; pero su mayor utilidad está en su capacidad de ir más allá y predecir otra serie de medidas que son potencialmente accesibles a la observación de acuerdo a las posibilidades técnicas de la época. Distingo entre predicciones, como aquellos valores arrojados por el modelo, y explicaciones, como una subsumición de una serie de medidas reales, y asocio la explicación a la justificación, en el sentido de que la explicación va por grados, dependiendo del nivel teórico a partir del cual sean derivados los modelos. También defiendo, con Kant, que la racionalidad científica consiste en la unifica-

I. HACIA UNA ELUCIDACIÓN DE LA PALABRA “MODELO”

ción y diversificación sistemática que articula el conocimiento, y no lo amontona en listas de hechos.

1.1. Modelos en Filosofía de la Ciencia

Mosterín (1987, p. 153) señala que la palabra “modelo” tiene dos sentidos fundamentales contrapuestos en el lenguaje natural. En uno de ellos, “modelo” se referiría a lo que ha sido representado, pintado o fotografiado. En el segundo sentido, se hablaría del extremo opuesto de la relación: la representación, la pintura, la fotografía. Esta “radical equívocidad” se habría trasladado al lenguaje de la ciencia: la teoría de modelos desarrollada por la Matemática y las ciencias formales utilizan la palabra “modelo” para referirse al sistema donde se cumple la estructura que especifica la teoría: el modelo resulta la estructura realizada, concreta, frente a la estructura abstracta que constituye la teoría. En las ciencias empíricas, sin embargo, parece que el modelo se refiere a la representación, llegándose a confundir a veces con la teoría. El modelo sería la representación de un sistema para el que se busca una descripción o una explicación. Mosterín expresa su preferencia por el primer significado de modelo, que tan buenos resultados consigue en semántica a través de la Teoría de Modelos, y espera que al menos sea el que se utilice en el campo de la metodología, mientras llega a utilizarse en otras ramas del conocimiento, como en la ciencia empírica⁹.

Ferrater Mora, en su *Diccionario de Filosofía*, señala cuatro usos de la noción de modelo en epistemología:

1) Como modo de explicación de una realidad, especialmente la realidad física. Es el uso que se recoge en expresiones como “Los científicos buscaban un modelo mecánico de éter a partir de las indicaciones de Lord Kelvin”.

⁹ Cf. Mosterín (*ibid.*, p. 154): “Respecto a los otros usos de “modelo” en la ciencia empírica, convendría precisarlos en función de los conceptos desarrollados a partir de la teoría de modelos, máxime ahora que estos conceptos encuentran creciente aplicación en las investigaciones metodológicas sobre las teorías físicas”. Demostrar por qué no puede ocurrir esto, y por qué la ciencia empírica seguirá utilizando la noción de modelo como representación, frente al de estructura realizada, es uno de los objetivos de este capítulo, y, en general, de esta tesis doctoral.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

2) Como forma de representación de alguna realidad: un dibujo, un plano, una maqueta, etc.

3) Como sistema que sirve para comprender otro sistema, como cuando se toma el paso de un fluido por un canal como modelo de tráfico.

4) Como sistema real que la teoría trata de representar.

Los usos 2) y 4) corresponden a la distinción anterior entre la representación y lo representado, mientras que, según Mosterín (*ibid.*, pp. 154-156), el uso 3) (“servir de modelo”) sería reducible al significado 4) (“ser modelo de”). La razón está en que a la hora de describir un sistema complejo, como un avión real sometido a la presión del aire, podemos estudiar el comportamiento de otro sistema más simple que le “sirva de modelo”, como una maqueta a escala del avión. Ya que los sistemas comparten algunos rasgos relevantes, en caso de que la teoría construida a partir del sistema más sencillo sea válida para el sistema más complicado, decimos que los dos sistemas “son modelos de” la misma teoría. Los dos sistemas compartirían una misma estructura, caracterizada por la teoría.

Según cita Echeverría (1989, p. 45), Cristina Bicchieri, en la introducción a la versión italiana de la obra de Mary Hesse, *Modelli e analogie nella scienza*, distingue cinco significados diferentes:

1) *Modelos lógicos*. Constituyen una serie de interpretaciones semánticas de un sistema axiomático. En estas interpretaciones se cumple lo especificado por la teoría, de modo que los axiomas resultan verdaderos. Hay un isomorfismo estructural entre la teoría y el modelo.

2) *Modelos matemáticos*. En este caso, el isomorfismo estructural se da entre las leyes empíricas y un conjunto de fórmulas matemáticas que comparten la misma forma. Son representaciones matemáticas de una teoría física.

3) *Modelos analógicos*. En este tipo de representaciones entrarían los modelos mecánicos de Kelvin, un sistema planetario a escala, o una representación gráfica tridimensional de un objeto o un sistema real. Se supone que sigue existiendo isomorfismo.

4) *Modelos teóricos*. También llamados modelos icónicos; son aquellos donde la representación se consigue a partir de una serie de suposiciones sobre la estructura real de un sistema. Aquí se citan el modelo atómico de Bohr, o el modelo de bolas de billar utilizado en teoría cinética de los gases.

I. HACIA UNA ELUCIDACIÓN DE LA PALABRA “MODELO”

5) *Modelos imaginarios*. Aquí los modelos especifican una serie de condiciones que no se cumplen en la realidad. La representación idealiza la realidad y la estudia como si fuera así, aunque no lo sea. Ejemplos serían el modelo de campo magnético de Maxwell o el modelo de Universo de Poincaré teniendo en cuenta la geometría de Lobachevski.

En esta clasificación se siguen destacando las características que ya señalaran Mosterín o Ferrater. En primer lugar, el modelo como sistema real y como representación. Dentro del modelo como representación, Bicchieri señala los puramente matemáticos, los que sirven como referencia para explicar otros sistemas, los que se interpretan de modo realista y tratan de adaptarse a la realidad, y por último, los que no corresponden a nada real, pero son más o menos útiles.

Otra clasificación se encuentra en Boniolo (2004), quien distingue entre a) las teorías, que representan *hipotéticamente* los fenómenos, y nos permiten organizar, predecir y dar un significado cognitivo a los hechos empíricos conocidos; y b) los modelos, como representaciones *ficticias* de la realidad, herramientas conceptuales para uso práctico que tratan al mundo “como si” fuera lo que ellos describen¹⁰. Los modelos se dividen en:

1) *Principle models*, los cuales dependen de la estructura de la teoría, y ofrecen un simulacro de su representación hipotética. Dentro de ellos, Boniolo destaca:

1.1.) *Focusing models*, donde los modelos ejemplifican lo que la teoría de los que son deducidos no alcanza. La Teoría General de la Relatividad, como representación abstracta, necesita, para representar universos específicos, una métrica que dote de significado físico a las ecuaciones de campo, por ejemplo, en el modelo de Schwarzschild. Según sean las condiciones iniciales que se determinen, así resultará el modelo.

1.2.) *Replacing models*, que representan un mundo imaginario análogo al descrito por la teoría a la cual sustituyen, para poder predecir consecuencias observables. Boniolo cita como ejemplo la teoría cinética de los gases, que en principio describe una situa-

¹⁰ La teoría, para Boniolo, representa mediante hipótesis “how the world is”, mientras que un modelo representa un “as-if-world”. En ambos casos hay una comparación entre las estructuras construidas y las estructuras reales del mundo. La analogía puede ser hipotética, en el caso de la teoría, y ficticia, en el caso de los modelos. Véase el Cap. VIII, § 8.4, para una discusión sobre el uso de estos modelos en Física Nuclear.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

ción determinista, pero que no se puede manejar matemáticamente. De ahí que sea necesario añadir una serie de ficciones, como la consideración de las moléculas como esferas rígidas, que chocan elásticamente en una distribución uniforme, donde cada componente de la velocidad es independiente de las otras, y la distribución del promedio de la velocidad es isotrópica.

2) *Phenomenological models*, que no comparten su estructura con ninguna teoría, y que son construidos como redes para salvar las apariencias de un fenómeno para el que no se cuenta con ninguna ley fundamental. Aquí los modelos son el único recurso que puede dar una mínima correlación para los datos de observación. Un ejemplo sería el modelo de Rayleigh y Jeans de 1905 para solucionar el problema del cuerpo negro, y que fue construido tomando algunos resultados teóricos del Electromagnetismo, la Teoría Cinética, y la Geometría, para poder aproximarse a los resultados experimentales con propósitos prácticos. Estos modelos son provisionales, y si no salvan las apariencias son rápidamente olvidados. Boniolo (*ibíd.*, p. 10) también considera los modelos del núcleo atómico en Física Nuclear como modelos fenomenológicos.

3) *Object models*, los cuales no tienen consecuencias observables, pero que permiten a las teorías y a los demás tipos de modelo poder tenerlas. Para ello, suponen que los objetos irregulares del mundo son regulares, a partir de idealizaciones como el cuerpo rígido, la distribución esférica, o las partículas cargadas. Boniolo introduce aquí el error experimental que arrastran tales consideraciones, y que absorbe las diferencias entre la realidad y la ficción.

Boniolo, como físico, trata de adaptarse al lenguaje representacional de la Física, donde los modelos son siempre representaciones construidas de distintas formas. Considera que las ecuaciones diferenciales de la Física no son ficciones, sino esquemas matemáticos que sólo adquieren sentido físico cuando se aplican a situaciones particulares; en caso contrario, no son más que “void mathematical tools”, “pieces of mathematics”. También distingue entre modelos y teorías matemáticas; la Teoría Determinista del Caos (TDC) sería una representación hipotética matematizada de un aspecto de la realidad, y, por tanto, no constituiría un modelo.

Como vemos, hay ciertas ideas de lo que es un modelo que se repiten más o menos en todas las clasificaciones; primeramente, su carácter de *representación* o de sistema *real*; secundariamente, *el grado de verdad* de las premisas que construyen el mo-

I. HACIA UNA ELUCIDACIÓN DE LA PALABRA “MODELO”

delo. Sin embargo, no hay un consenso general acerca de su significado; baste considerar el siguiente listado provisional de usos con el que se utiliza la palabra en el lenguaje de la Filosofía de la Ciencia:

1) Como *modelos de una teoría matemática*, la cual está clausurada respecto de su relación de consecuencia lógica, en el sentido indicado por Tarski (1956)¹¹.

2) Como *interpretaciones de un sistema axiomático*, dentro del positivismo lógico, donde los modelos son interpretaciones parciales de la teoría a través de las reglas de correspondencia. Es la presentada por Carnap (1947), y que puede considerarse, junto a 1), el punto de partida de los demás análisis.

3) Como *entidades no lingüísticas*, donde la clase de modelos **M** de una teoría **T** define un conjunto de mundos compatibles con la verdad semántica de **T**. Esta concepción es la defendida por Suppe (1990), y distingue entre verdad empírica y semántica¹².

4) Como *sistema real*, físico, que comparte la misma estructura que la teoría. En la concepción estructuralista de las teorías, los modelos son ejemplos de la teoría. Sneed (1971) y Stegmüller (1981) desarrollan esta versión¹³.

5) Como *modelos icónicos*, en el sentido de Campbell (1957) o Hesse (1966), que especifican el contenido empírico de la teoría por medio de sistemas conocidos de los que pudiera señalarse si existe una analogía positiva, negativa o neutral¹⁴.

6) Como *modelos mediadores*, donde el enfoque descansa en las aproximaciones y simplificaciones que permiten desarrollar y manejar los aspectos formales de las teorías, sin que los modelos formen parte de ellas. Véase, por ejemplo, Morrison (2001).

7) Como *modelos teóricos*, que alcanzan mediante hipótesis de bajo nivel la base empírica donde no llega la teoría a falta de leyes fundamentales capaces de explicar el fenómeno. Esta noción, con matices, es la defendida por Boniolo (2004) o Rivadulla (2004)¹⁵.

¹¹ Véase *infra*, § 1.2.

¹² Véase Cap. VI. Según estos autores, una teoría caracteriza la clase de modelos compatibles con su verdad semántica. Las consecuencias observables de una teoría son semánticamente verdaderas en todos los modelos. Sin embargo, la verdad empírica hace referencia a la descripción más o menos fiel que la teoría hace de la realidad. La verdad empírica lo único que hace es preguntarse si el mundo real está en uno de los modelos de la teoría. Véase Suppe (1990, p. 149).

¹³ Véase Cap. IV, § 4.1.

¹⁴ Véase Cap. V.

¹⁵ Véase Cap. VIII.

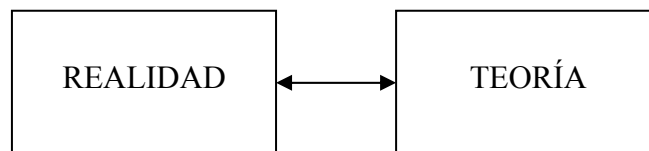
MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Analicemos primeramente el modelo como estructura realizada (significados 1, 2, 3, 4), y olvidémonos de momento de la noción de modelo como representación (7, fundamentalmente), que es la posteriormente voy a defender (*infra*, § 1.4).

Así pues, caractericemos, de entrada, la relación “ser modelo de” con la letra **M**. **M** sería una relación binaria tal que:

$$x \mathbf{M} y = \text{“}x \text{ es un modelo de } y\text{”}$$

Si el modelo constituye la estructura que ejemplifica la teoría, los dos componentes x e y de esta relación son la realidad y la teoría, respectivamente:



Se supone que la realidad es un sistema, una entidad formada por objetos y por una serie de relaciones y funciones entre ellos. La teoría es un conjunto de enunciados, fórmulas o esquemas que intenta reproducir el sistema real. (Sin embargo, como luego veremos, en la concepción estructuralista la teoría no tiene carácter enunciativo.) Las variables que utiliza la teoría se corresponden con los objetos o individuos del sistema, mientras que sus conceptos, predicados y relaciones se refieren a las relaciones que se dan en el sistema real.

Si la teoría describe el sistema de la realidad, es decir, si la realidad funciona tal y como la teoría dice, el sistema es un modelo de la teoría. Por ejemplo, el sistema solar es un modelo de la teoría de Kepler porque obedece a las leyes especificadas por Kepler, del mismo modo que el sistema experimental de interferómetro realizado por Michelson y Morley en 1887 es un modelo de la Teoría de la Relatividad restringida de Einstein, porque tiene la misma estructura que la teoría específica.

Desde la concepción estructuralista, la teoría se ve ejemplificada en los sistemas particulares de la realidad, de manera que una teoría puede tener varios modelos asociados, varias aplicaciones donde la teoría es verdadera porque su estructura refleja, simula o se corresponde con la realidad.

I. HACIA UNA ELUCIDACIÓN DE LA PALABRA “MODELO”

Así, la Mecánica Clásica de partículas tendría como modelos el sistema solar, el sistema de las mareas, el sistema formado por un péndulo, el sistema Tierra - proyectil, el sistema formado por dos bolas que chocan, etc. En todos estos modelos, resulta que se cumple la estructura teórica dictada por las leyes de la Mecánica Clásica. La estructura de una teoría se podría definir *extensionalmente* como la clase de modelos que la satisfacen.

Lo que comparten la realidad y la teoría es la forma, la estructura. Podemos partir de un sistema y buscar una teoría que lo satisfaga, o bien partir de una teoría y buscar los sistemas de la realidad física donde se cumple. En cualquier caso, la adecuación formal entre los planos teóricos y reales decide si la teoría es verdadera, en cuyo caso, como hemos visto, el sistema es un modelo de la teoría.

Todas las versiones que defienden el modelo como estructura realizada parten de los análisis semánticos desarrollados por Tarski en sus estudios sobre los lenguajes formales. Consideraremos en la siguiente sección sus virtudes, y, posteriormente, sus límites.

1.2. Teoría de Modelos

La Teoría de Modelos fue iniciada por Tarski a partir de su noción semántica de verdad. En su celebrado artículo de 1931, “El concepto de verdad en los lenguajes formalizados”, distingue entre el lenguaje objeto (por ejemplo, el lenguaje de la física) y el metalenguaje (el lenguaje que se utiliza para hablar del anterior). El predicado “ser verdadero” se aplica a los enunciados del lenguaje objeto desde el metalenguaje, por lo que no tiene sentido hablar de la verdad dentro del propio lenguaje objeto. En caso contrario, el error que cometeríamos (error en el que según Tarski cae frecuentemente el lenguaje natural) sería no distinguir entre uso y mención, dando lugar a paradojas como la del mentiroso.

La noción semántica de verdad reconsidera, a partir de esta distinción entre objeto lingüístico y propiedades metalingüísticas, la doctrina de Aristóteles según la cual “decir de lo que es que no es y de lo que no es que es, es falso; mientras que decir de lo que

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

es que es, o de lo que no es que no es, es verdadero”¹⁶. La definición de enunciado verdadero no sólo debe ser formalmente correcta, sino empíricamente adecuada, tal que un enunciado es verdadero si y sólo si lo indicado por él se cumple en la realidad. Así, la *convención T (True)* estipula:

“*p*” es verdadera si y sólo si *p*

“*p*” es la denominación metalingüística de un enunciado que dice algo acerca del mundo (que se refiere a un estado de cosas, que es significativo por cuanto tiene una referencia en el mundo real), y cuya verdad depende de que se dé realmente *p*.

La semántica estudia la relación que los lenguajes formales guardan con la realidad, para que no queden vacíos de contenido, y se refieran a algo real, o con posibilidad de ser real. Para ello se introduce el concepto de sistema, *S*, definido mediante predicados conjuntistas. Así, *S* es un sistema si y sólo si:

$$S = \{U, R_1, \dots, R_n\}$$

U es el universo de discurso, conjunto no vacío de objetos distinguibles unos de otros; constituye la ontología de la estructura, y pueden ser planetas, seres humanos, números naturales, organismos, etc. *U* designa una porción de mundo donde se discriminan sus objetos.

*R*₁, ..., *R*_{*n*} son las propiedades y relaciones que se dan entre los elementos de *U*. Por ejemplo, “atraerse mutuamente”, entre planetas; “ser número primo”, entre números naturales; “ser parte de”, entre organismos. Las relaciones *n*-ádicas expresan los *n* objetos que pueden intervenir en la relación, siendo las relaciones monádicas (o propiedades) un caso particular¹⁷.

La interpretación *I* es una función que hace corresponder un lenguaje formal *L* con la realidad. Para ello asigna a los símbolos no lógicos del lenguaje formal un contenido

¹⁶ *Metafísica*, Γ 7, 27.

¹⁷ Las relaciones pueden ser más complejas, por ejemplo, si añadimos operaciones que se efectúan entre los objetos. Véase Garrido (1995, p. 169). En Quesada (1985, pp. 108-111) se efectúa la *interpretación* con más detalle.

I. HACIA UNA ELUCIDACIÓN DE LA PALABRA “MODELO”

definido, una referencia, una denotación, tal que las fórmulas del lenguaje puedan ser ahora afirmadas o negadas obteniendo un valor de verdad.

Sea Γ un conjunto de fórmulas de un lenguaje formal de primer orden L .¹⁸ Por un lado, tenemos símbolos lógicos como cuantificadores y conectores ($\forall, \exists, \neg, \wedge, \vee, \rightarrow, \leftrightarrow$), definidos sintácticamente y, por tanto, con un significado preciso. Por otro lado, los símbolos no lógicos están formados por letras predicativas ($P, Q, R, \dots, P_1, Q_1, R_1, \dots, P_m^n, Q_m^n, R_m^n, \dots$) y constantes individuales ($a, b, c, \dots, a_1, b_1, c_1, \dots$).

Pues bien, a cada letra predicativa se le asigna una relación n -ádica R que se corresponda con una relación n -ádica real \mathbf{R} del Universo escogido¹⁹. Lo que hacemos entonces es asignar a las relaciones formales las relaciones reales del sistema. Es decir,

$$I(R) = \mathbf{R}$$

Del mismo modo²⁰, a cada constante individual se le hace corresponder un individuo del Universo U , tal que

$$I(a_i) = \mathbf{a}_i$$

Una vez que mediante la interpretación hemos dotado al esquema formal de un contenido, podemos decidir si las fórmulas interpretadas son verdaderas o falsas. Así, se considera que una interpretación I *satisface* a un conjunto de fórmulas cuando la interpretación las convierte en verdaderas.

Si $\langle \mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_n \rangle$ es una secuencia o serie ordenada de objetos del universo, y $Rx_1\dots x_n$ es una predicación n -ádica sobre n constantes individuales $a_1\dots a_n$, se dice que la interpretación I satisface $Ra_1\dots a_n$ si y sólo si la relación n -ádica R conviene a la secuencia $\langle \mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_n \rangle$.

¹⁸ Un *lenguaje formal*, en general, comprende 1) su alfabeto lógico, donde aparecen los signos, variables y constantes; 2) reglas de construcción de fórmulas que permitan decidir si una fórmula está bien construida; 3) reglas de transformación entre fórmulas, para permitir la conversión de unas fórmulas a otras.

¹⁹ Designo con letra **negrita** las variables que se dan en el plano de la realidad, y en *cursiva* las que pertenecen al nivel teórico.

²⁰ Cf. Garrido (1995, p, 170).

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

La noción de satisfacción proviene de la matemática, donde, por ejemplo, hay determinados valores de una variable que satisfacen una ecuación. Los valores que satisfacen la ecuación “ $x^2 = 2$ ” serían $\pm \sqrt{2}$. Para el lenguaje natural, existen predicados que sólo son satisfechos por ciertos individuos u objetos. La expresión “ x apoya la interpretación de Copenhague porque así lo ha dicho Bohr”, sería satisfecha por la clase de personas que efectivamente defiendan la interpretación de Copenhague porque Bohr se hubiera mostrado a favor de ella.

Si la interpretación satisface las fórmulas lógicas para toda secuencia, la interpretación es un *modelo* de esas fórmulas lógicas. En símbolos,

$\Vdash \text{Mod } \Gamma$

El modelo es también el resultado de la interpretación, la estructura que resulta después de interpretarse las fórmulas lógicas. En la realidad física, un modelo sería una secuencia de objetos que respondieran a la estructura de la teoría. Según Tarski (1956, p. 416), después de haber obtenido la clase L' de funciones enunciativas reemplazando las constantes extralógicas de L por las correspondientes variables, “una secuencia arbitraria de objetos que satisface toda función enunciativa de la clase L' recibirá el nombre de un modelo o realización (justo en el sentido en que usualmente se habla de modelos de un sistema de axiomas de una teoría deductiva).”

Las teorías matemáticas así definidas permiten un análisis riguroso desde la Metamatemática, combinando el estudio sintáctico con el semántico y averiguando si la teoría cumple una serie de propiedades importantes, como la consistencia²¹, completud²², decidibilidad²³ o independencia²⁴. La teoría queda entonces definida como un

²¹ El sistema formal será *consistente* si no da lugar a contradicción, lo que en el caso de una teoría lógica se establecería demostrando que las fórmulas que se deducen en el cálculo son verdades lógicas. Es decir, cuando dada una fórmula α , $Si \vdash \alpha$, entonces $\Vdash \alpha$.

²² La teoría sería *completa* si fuera capaz de derivar todas las verdades lógicas, de la siguiente manera: $Si \Vdash \alpha$, entonces $\vdash \alpha$. Mediante esta segunda condición el sistema se asegura la deducibilidad a través de la verdad lógica. Gödel, en 1930, demostró que la lógica de primer orden era consistente y completa, mostrando la equivalencia entre sintaxis y semántica en este nivel lógico: $\Vdash \alpha$ si y sólo si $\vdash \alpha$.

²³ Por su parte, la *decidibilidad* de una teoría depende de la existencia de un algoritmo que permita conocer en un número finito de pasos si una fórmula α es deducible en el sistema. Este algoritmo permite

I. HACIA UNA ELUCIDACIÓN DE LA PALABRA “MODELO”

conjunto de proposiciones *clausurado* respecto a la relación de consecuencia, lo que quiere decir que todas sus consecuencias le pertenecen. Intuitivamente, si todas las proposiciones α que es capaz de derivar un conjunto de proposiciones pertenecen a ese conjunto, entonces el conjunto de proposiciones está clausurado, forma una teoría y sus proposiciones son teoremas.

Las ventajas de considerar a la teoría como un sistema axiomático interpretado son muchas: permite estudiar si la teoría es axiomatizable, categórica, consistente, contradictoria, indecidible, compacta, completa o correcta; también analiza la naturaleza de los subconjuntos teóricos, las extensiones, y la relación que dos teorías así formuladas guardan entre sí: si son equivalentes, compatibles, o reducibles unas a otras.

Más aún, la formulación de una teoría en lógica de primer orden permite disponer de los teoremas de compacidad²⁵ y de Löwenheim-Skolem²⁶, teniendo la seguridad de que la teoría contiene todas sus consecuencias lógicas y está clausurada respecto de la relación de derivabilidad. Es la noción más utilizada en Álgebra, en Teoría de la Computación y en Inteligencia Artificial. Sin embargo, no permite axiomatizar la aritmética más elemental, como la de Peano, basada en la noción de sucesión, y donde se necesita una lógica que cuantifique predicados.

resolver mecánicamente (mediante un procedimiento) si α pertenece o no al sistema. En lógica de enunciados, existen varios métodos (mediante tablas de verdad, por ejemplo) para comprobar que una fórmula es o no es una tautología. No así en lógica cuantificacional de primer orden, en general, aunque sí para la lógica de predicados monádicos. Tampoco existe ese procedimiento para la aritmética, como puso Church de manifiesto en 1936.

²⁴ Una teoría es *independiente* cuando ninguno de sus axiomas o reglas primitivas puede ser derivado del resto de los axiomas o reglas. Mediante el principio de Padoa de 1900, sobre la definibilidad de los términos, probado por Beth en 1953, se averigua si los términos de una teoría son primitivos o definidos; para probar que un axioma es independiente, bastaría encontrar un modelo de la teoría que no pudiera interpretarse solamente con el resto de los axiomas.

²⁵ Si todo subconjunto finito de un conjunto infinito de enunciados es satisfacible, entonces ese conjunto es satisfacible.

²⁶ Si un conjunto de fórmulas cualquiera Γ es simultáneamente satisfacible en cualquier dominio no vacío, entonces es simultáneamente satisfacible en un dominio enumerable. Un conjunto es enumerable si es posible establecer una biyección entre sus elementos y el conjunto de los números naturales \mathbb{N} . Es decir, si tiene su mismo cardinal, \aleph_0 .

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

La lógica de segundo orden, en este sentido, es más expresiva, y permite caracterizar los números reales \mathbf{R} , pero tiene las limitaciones señaladas por el teorema de incompletud de Gödel²⁷ y el teorema de Lindström (1969)²⁸.

Los análisis metamatemáticos basados en estas nociones de teoría y modelo han conseguido muchos logros en lo que a Fundamentación de la Matemática se refiere, impulsando el programa logicista iniciado por Frege; en la actualidad, las investigaciones se desarrollan en campos como Teoría de Modelos, Funciones Recursivas y Teoría de Algoritmos. La Metamatemática, por ejemplo, trata de encontrar algoritmos decisivos para las teorías decidibles, y pruebas de indecidibilidad para las indecidibles, llegando las aplicaciones hasta la Lingüística o la automatización del razonamiento.

Pero la pregunta que nos hacemos aquí es si el lenguaje de primer orden, o cualquier otro lenguaje lógico que consideremos, es *adecuado* para la descripción de las proposiciones físicas, y si recoge con suficiente claridad su contenido.

1.3. Críticas al reduccionismo lógico

Sin pretender ser exhaustivo, indicaré cuatro razones por las que considero que los enunciados de la Física no son traducibles a un lenguaje lógico.²⁹

Primera razón: *El lenguaje lógico no recoge el significado de los símbolos fundamentales de la Física.*

Consideremos la siguiente ecuación, considerada como la ley fundamental de la conducción del calor:

$$(1) \quad \rho c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} = \nabla \cdot (k \nabla t) + q^*$$

²⁷ Cualquier teoría axiomatizable y consistente de la aritmética es incompleta.

²⁸ La lógica de primer orden es la lógica más expresiva que todavía satisface los teoremas de compacidad y de Löwenheim-Skolem.

²⁹ Con ello no quiero indicar que no utilicen los esquemas de deducción lógicos, sino que el lenguaje lógico no es lo suficientemente rico para subsumir el tipo de relaciones que se dan en Física.

I. HACIA UNA ELUCIDACIÓN DE LA PALABRA “MODELO”

donde ρ es la densidad del cuerpo, k es la conductividad térmica, c_p es el calor específico, q^* es la velocidad a la que se genera el calor por unidad de volumen, t es la temperatura y τ el tiempo. El operador vectorial ∇ es el operador nabra:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}$$

La ecuación (1) expresa un equilibrio calorífico que existe en todos los puntos del cuerpo, y describe en forma de una ecuación diferencial la dependencia de la temperatura respecto de las condiciones geométricas del sólido y del paso del tiempo.³⁰

Pues bien, ¿es ésta una ecuación expresable en términos de una lógica de primer orden? ¿Dónde están aquí los objetos? ¿Cuáles son las propiedades y las relaciones n -ádicas? ¿Cuáles son las variables ligadas? ¿Por dónde empezamos a cuantificar?

Una solución sería usar la lógica de predicados y cuantificar las propiedades del cuerpo. Usando el vocabulario de los símbolos, llegaríamos a:

$$(\forall \rho \forall k \forall c_p \forall q^* \forall t \forall \tau) (\exists F(\rho, c_p, t, \tau) \exists G(k, t, q^*))$$

tal que

$$F(\rho, c_p, t, \tau) \leftrightarrow G(k, t, q^*)$$

Suponiendo que el signo “ \leftrightarrow ” traduzca el signo de igualdad “=”, la nueva expresión sigue sin aportarnos absolutamente nada nuevo. Pero, además, ¿qué hacer con el operador nabra? La expresión utiliza derivadas parciales de una variable respecto de las magnitudes espaciales x, y, z . La introducción del operador derivada está muy lejos del alcance de los signos lógicos, e incluso, históricamente, de los signos matemáticos: es un concepto fundamentalmente físico, desarrollado por Leibniz y Newton a partir de problemas físicos³¹. La llamada interpretación “geométrica” del concepto de derivada olvida lo fundamental de su definición física: que es un límite, ni más ni menos, entre

³⁰ Véase, por ejemplo, Chapman (1984, Cap. 1, § 1.4.)

³¹ Problemas físicos cuya formulación precisa (tangente a una curva, variación infinitesimal, velocidad instantánea, etc.) sólo tenían sentido a raíz de la construcción por Descartes de la Geometría Analítica. Véase Kline, 1992, Cap. 17, § 1, para una introducción a las motivaciones del Cálculo.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

dos puntos de una trayectoria donde uno tiende a encontrarse con el otro. Este “tender” es muy difícil de precisar incluso dentro de la matemática, que emplea todo su aparato técnico de teoría de sucesiones y límites; la dificultad aumentaría si tratáramos de definir esta noción fundamental mediante un predicado o una relación dentro de la lógica, que en todo caso, como mucho, repetiría lo que ya dice por sí sólo el símbolo “ ∂ ”.

Ninguna traducción al lenguaje de la lógica nos va a dar lo fundamental de esta ecuación: la variación de la temperatura en función del resto de las magnitudes. Como quiera que las leyes fundamentales de la Física están expresadas en formas de ecuaciones diferenciales, la Física no es traducible a la Lógica, es decir, no es reducible a ella, y, en cualquier caso, esta traducción, o interpretación, nunca aportará más de lo que las ecuaciones físicas dicen por sí solas, sin necesidad de que se les aclare la estructura, cuya expresión ya está reducida al mínimo en las ecuaciones y resulta lo suficientemente explícita.

Segunda razón: *Si la Física fuera un sistema axiomático no sería posible deducir la inmensa mayoría de sus leyes.*

Continuemos dentro de la teoría de la conducción del calor; consideremos la ley de Laplace:

$$(2) \quad \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0,$$

que expresa la dependencia de la temperatura t en el sólido respecto de las coordenadas espaciales.

Mi pregunta es: si \mathbf{T} es una teoría axiomática, tal que de los axiomas se deducen los teoremas, y considerando que la ecuación (2) es un teorema de la termodinámica, ¿cómo se puede derivar lógicamente (2) a partir de los principios de esta teoría? Por derivar lógicamente entiendo, desde luego, la deducción de teoremas mediante el uso de algunas reglas de inferencia, como las de deducción natural de Gentzen, o la introducción de axiomas, reglas de formación y alguna regla de transformación, como en el sistema WR de Russell y Whitehead. Pero, ¿qué esquema inferencial nos va a permitir obtener (2) a partir de (1)?

I. HACIA UNA ELUCIDACIÓN DE LA PALABRA “MODELO”

Más concretamente, si L_1, L_2, \dots, L_m son las leyes de \mathbf{T} , y tanto (1) como (2) son leyes de conducción del calor (y así constan, desde luego, en cualquier manual de Termodinámica), ¿dónde está la relación lógica entre (1) y (2), la relación lógica *estricta*, se entiende? Porque (1) no implica (2), ni de (2) se va a obtener nunca (1) “generalizando”...

Sin embargo, para un físico es relativamente sencillo derivar (2) a partir de (1). No tiene más que considerar que i) la conductividad térmica es constante; ii) no hay variación de la temperatura respecto al tiempo (ecuación de Poisson); iii) no hay generación de calor interior. De hecho, estas condiciones no son suposiciones arbitrarias, y el científico puede diseñar un sistema experimental donde más o menos se cumplan, con lo cual la ley de Laplace resultaría válida y podría utilizarse.

Pero estas consideraciones simplificadoras, estos supuestos que facilitan los cálculos, estas situaciones experimentales que de hecho se dan en cualquier laboratorio del mundo, y que permiten comprobar la “verdad” de la ecuación en cuestión, estos supuestos, como digo, *no forman parte de la teoría*, y no pueden formar parte porque es imposible controlar todas las simplificaciones y adaptaciones posibles de las leyes fundamentales. Es decir, \mathbf{T} , el conjunto de leyes que liga los términos teóricos, no puede ser nunca dado de una vez, no puede ser generado mediante axiomas y reglas de inferencia. No hay tales reglas si no existen previamente simplificaciones que permitan adaptarse a las situaciones reales y posibles, condiciones experimentales donde las leyes se simplifican y el error que se comete es mínimo y resulta controlable en todo momento.

Si la Física fuera un cálculo axiomático interpretado, tendríamos, como mucho, una combinación algebraica de los axiomas primitivos; algo que no se desarrollaría hacia abajo, sino que permanecería estático, sin avanzar hacia los teoremas importantes. Un sistema axiomático es algo demasiado *rígido* para cualquier ciencia empírica, donde los márgenes son muy elásticos y flexibles para acomodarse a todo tipo de situaciones experimentales. El paso de unas leyes a otras no sólo se realiza mediante las reglas del álgebra, sino, fundamentalmente, a partir de suposiciones sobre la naturaleza física de los cuerpos.

Tercera razón: *Los sistemas físicos nunca se adaptan perfectamente a lo estipulado por la teoría: su adecuación es una cuestión de grado.*

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Yo puedo interpretar una teoría matemática de muchas maneras. Dada una serie de propiedades y relaciones, como una ley de composición interna que tenga la propiedad asociativa, conmutativa, elemento neutro y elemento simétrico, puedo buscar aquellos conjuntos de números naturales, vectores, o números racionales, por ejemplo, donde haya definida una ley de composición que cumplan tales propiedades, de manera que esos conjuntos resulten grupos abelianos, y pueda así afirmar que constituyen, con esa ley de composición, una interpretación de la teoría. De igual modo, puedo decir que el conjunto de los polinomios con coeficientes reales $\mathbb{R}(x)$, con las leyes suma y producto de polinomios tiene estructura de anillo conmutativo, o que los números racionales \mathbb{Q} , reales \mathbb{R} y complejos \mathbb{C} , tienen estructura de cuerpo respecto de las operaciones usuales de suma y producto.

En estos casos, *la demostración asegura la verdad completa de la interpretación*. Dada la naturaleza de los conjuntos matemáticos (como números, vectores, o cualquier otra serie de elementos definida extensional o intensionalmente de una manera precisa), sus propiedades y la forma en que son construidos, yo puedo tener la seguridad de que el modelo se ajusta perfectamente a lo señalado por la teoría, de modo que, o se da la estructura, o no se da. No cabe hablar de un más o un menos: el sistema que se estudia, o es un modelo, o no lo es.

Sin embargo, en el caso de la Física, nunca existe la seguridad completa de que el sistema va a responder para siempre a la estructura especificada por la teoría. Su ajuste y desajuste es un grado mayor o menor, perfectamente mensurable, por otra parte, en el error. Los sistemas físicos no se adaptan a la teoría de forma tan brutal: el sistema solar, en todo caso, es *más o menos* lo que especifica la Teoría de Newton; no puede haber ninguna demostración que haga para siempre verdadera la teoría en ese dominio; la adaptación es relativa, y siempre puede cambiar.

De entrada, no hay ninguna correspondencia perfecta entre la realidad y la teoría; esto es completamente imposible: el valor de verdad de los modelos no es un “1” o un “0”, sino cierta “aceptabilidad empírica”³², cierto grado de ajuste, de conformidad, que

³² La expresión es sugerente, y me ha sido indicada por el Profesor Rivadulla. Sin duda que los enunciados de observación predichos por una teoría, más que resultar adecuados o inadecuados, son más o menos aceptables: la decisión de dar por buenas o malas las predicciones corresponde en todo caso al científico, sin que exista ningún procedimiento decisorio mecánico.

I. HACIA UNA ELUCIDACIÓN DE LA PALABRA “MODELO”

en ningún caso ejemplifica la teoría, como si el mundo, de pronto, se hubiese convertido en un sistema teórico de naturaleza platónica donde se distinguen sus armonías y proporciones de una manera exacta y completa. Por eso en las ciencias empíricas el modelo nunca es la realidad, sino la representación; constituye más bien un bosquejo, un dibujo, un *esquema* de comportamiento, y nunca se corresponde perfectamente con el mundo.

Cuarta razón: *Modelos que desde el punto de vista de la Física representan un único fenómeno, para el reduccionismo lógico designarían fenómenos distintos.*

La *equivalencia física* entre modelos es una de las propiedades más destacadas de la Física, donde es posible sustituir unos sistemas por otros sin perder nada de la información del fenómeno. En estas transformaciones y reducciones de unos sistemas a otros (por ejemplo, la sustitución de sistemas más complicados por otros más sencillos), cambia el número de objetos y el número de las relaciones, por lo que desde un punto de vista extensional se referirían a fenómenos distintos, porque la estructura algebraica habría cambiado. Sin embargo, la Física considera que hay muchas representaciones para un mismo fenómeno, todas equivalentes entre sí, y que de ningún modo se refieren a cosas distintas; es decir, la realidad física es esquematizable de distintas maneras. *No hay una única representación para un fenómeno, sino varias, y todas ellas perfectamente compatibles entre sí.*

Volvamos a la Aritmética. Mientras que en el conjunto de números naturales \mathbb{N} sus elementos (infinitos) están perfectamente definidos intensionalmente, tal que ni sus objetos (el universo de discurso U), ni su cardinal \aleph_0 , cambian, y son la referencia para las distintas transformaciones, aplicaciones y correspondencias efectuados sobre ellos, no ocurre lo mismo en un fenómeno físico, donde los objetos (y sus propiedades) pueden variar en las distintas representaciones sin que deje de resultar un *fenómeno físico idéntico*.

Por ejemplo, los siguientes circuitos representados en las *Figuras 1.1 y 1.2*. son considerados equivalentes desde el punto de vista físico:

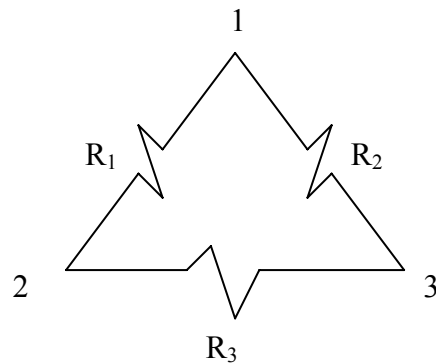


Figura 1.1.

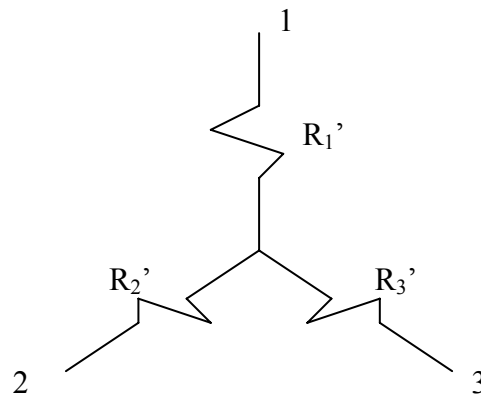


Figura 1.2.

Ambos sistemas no designan fenómenos diferentes, sino una misma realidad física. Desde el punto de vista de la Teoría de Modelos, aquí hay conjuntos y relaciones diferentes, por lo que se referirían a teorías y modelos distintos. Sin embargo, es la propia teoría, en Física, la que permite la sustitución de un sistema por otro. Basta con aplicar los teoremas de Kennely, que permiten pasar de un circuito en forma de triángulo a un circuito en forma de estrella, para facilitar el cálculo de las intensidades de las corrientes conocidas las diferencias de potencial entre los bornes 1, 2, y 3. Utilizando las leyes de Kirchoff, hallaríamos las relaciones entre las resistencias:

$$R_1' = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3}; \quad R_2' = \frac{R_3 \cdot R_1}{R_1 + R_2 + R_3}; \quad R_3' = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3}$$

I. HACIA UNA ELUCIDACIÓN DE LA PALABRA “MODELO”

Estas fórmulas permiten el paso y la sustitución de un sistema por otro.Cuál se utilice dependerá del problema en cuestión, y de los datos disponibles. Lo importante es que ambas representaciones constituyen modelos completamente equivalentes, que no dejan de referirse en ningún momento al mismo fenómeno físico, sólo que estructurado de diferente forma.

De igual manera, consideremos el sistema compuesto por dos partículas, una de las cuales se encuentra en reposo respecto al sistema de referencia fijo del laboratorio y con energía relativista total E_1 . La segunda partícula se mueve hacia la derecha con energía relativista total E_2 y cantidad de movimiento p_2 . Pues bien³³, puede demostrarse que este sistema es equivalente a otro en el que el centro de masas relativista del sistema se encuentre en reposo y el sistema de referencia se mueva hacia la derecha con velocidad

$$v = c \frac{cp_2}{E_1 + E_2},$$

siendo la cantidad de movimiento total igual a cero respecto de este sistema de referencia. De dos partículas hemos pasado a una sola: ¿son fenómenos distintos, o ambas representaciones se refieren a la misma cosa, sólo que esquematizada de manera distinta? ¿Qué es lo “real” aquí? ¿El primer sistema? ¿Por qué? ¿Porque las partículas existen, y el centro de masa no? ¡Pero se trata del mismo fenómeno! ¡La equivalencia física no discrimina entre representaciones: *todas tienen el mismo valor!* ¡La Teoría de Modelos tiene que dar preferencia a una estructura particular para poder definir el fenómeno! ¡Y, sin embargo, un cambio en la estructura puede mantener la misma información física, y referirse a un mismo fenómeno!

En todas estas transformaciones de equivalencia física el universo de discurso U puede variar hasta el punto de no ser reconocidos los objetos iniciales. ¿Cómo vamos a elaborar, en principio, una “biyección” entre sistemas si no permanecen los objetos? ¿Cómo se va a establecer siquiera una relación de “aplicación”, o de simple “correspon-

³³ El planteamiento de este problema está en Eisberg & Resnik (2000, p. 745).

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

dencia”³⁴, cuando las propias relaciones cambian, no sólo en cuanto a número, sino que expresan propiedades y cantidades completamente diferentes?

Un fenómeno físico puede ser representado por infinidad de ontologías diferentes, siendo todas ellas perfectamente compatibles entre sí, y conservando la misma información. Es decir, el mundo no es representable de una única manera: los modelos equivalentes pueden sustituirse entre sí, y la elección de un modelo sobre otro no está decidida *a priori*, sino que depende del problema en cuestión que se trate de resolver. En particular, y como insistiré posteriormente a partir del Capítulo IV, en mi análisis sobre los modelos estructuralistas, ni el número de objetos ni el número de relaciones *definen* una realidad física. Si quisiéramos expresar esto en una teoría lógica, habría que estar transformando continuamente la teoría para que sus letras de individuos (constantes individuales) pudieran cambiar, y no sólo eso, sino que también cambiaran las relaciones. De otra manera, lo que en Teoría de Modelos serían varias teorías, en Física sería una, aunque expresada “ontológicamente” de muy diferentes maneras.

Habría que pasar de la lógica de primer orden a la segunda, por ejemplo, cuando tuviéramos un sistema equivalente; ello requeriría una especie de “función transformadora” que saltase de un nivel lógico a otro y actuase sobre los objetos iniciales de U y sus relaciones tal que su nuevo conjunto imagen tuviera un número mayor o menor de objetos y sus relaciones hubieran cambiado. En todo caso, aun en este supuesto, afirmo que la Lógica siempre iría *por detrás* de la Física, y no añadiría *ningún* contenido más.

Pero este tipo de transformaciones, de reducciones de unos sistemas físicos a otros, de cambios en los ejes de referencia, en las coordenadas, para operar mucho más cómodamente, sin perder un ápice de información, es uno de los métodos fundamentales de la Física, si no el más importante, y toda Filosofía de la Ciencia debería de tenerlo en cuenta.

En conclusión, dudo mucho que las nociones de teoría como sistema axiomático interpretado y la de modelo como la clase de sus realizaciones, en todas sus múltiples

³⁴ Una *correspondencia* entre dos conjuntos A y B es un subconjunto S del producto cartesiano $A \times B$. El subconjunto $S \subset A \times B$ se llama *grafo* de la correspondencia. Una correspondencia entre A y B de grafo S es una *aplicación* de A en B si para cada x existe, a lo sumo, un elemento $y \in B$ tal que $(x, y) \in S$. Después de estas definiciones, ¿qué se quiere indicar cuando se dice que hay una “correspondencia” entre los elementos del modelo y los elementos físicos del mundo? ¿Los elementos físicos de la realidad tienen el carácter de “números”? ¿No cambia su cardinal, son fijos, eternos, y no varían?

I. HACIA UNA ELUCIDACIÓN DE LA PALABRA “MODELO”

versiones, sea útil para descubrir los mecanismos implicados en el descubrimiento, modelización y justificación de las ciencias empíricas, especialmente en el caso de la Física o de la Química³⁵.

1.4. El proceso de modelización científica

Vistas estas cuatro razones, quisiera regresar a la concepción de modelo como *representación*. Tampoco aquí, dada la amplia terminología utilizada, y a pesar de los muchos intentos que se han hecho por conseguirlo, existe un acuerdo general sobre el uso y alcance de la noción de modelo, ni una división clara entre teoría y modelo, llegándose a confundir en la práctica. Mi propuesta provisional es la siguiente:

*El proceso de modelización consiste en la representación de un fenómeno **F** mediante la construcción de un modelo **M**, por parte de un científico **C**, a partir de los datos experimentales **D**, y con la ayuda de una serie de enunciados teóricos considerados verdaderos **T**, o, alternativamente, de un conjunto de hipótesis **H**.*

D son los datos experimentales previos a la resolución del problema, y pueden incluir una tabla de mediciones que especifica el valor de algunas variables en función de otras. **D** también incluye, como caso particular, las condiciones iniciales del fenómeno que se pretende modelizar, las condiciones de contorno o frontera y, en su caso, las condiciones de periodicidad. Incluyo este tipo de condiciones iniciales en **D** porque son proposiciones de las que se parte, y pueden ser diseñadas expresamente por el experimentador. En general, constituyen el *primer grupo de enunciados aceptados*, en este caso de observación³⁶.

³⁵ Insistiré nuevamente en esta idea en los Capítulos IV, V y VI, que tratan sobre la concepción estructuralista de las teorías y los modelos semánticos: *el modelo no puede ser considerado una realización, sino una representación*.

³⁶ En **D** se dan también la serie de constantes que la Física considera fundamentales. Por ejemplo: aceleración de la gravedad a nivel del mar en el ecuador, constante de Boltzmann, constante de Coulomb, longitud de onda Compton del electrón, constante de Avogadro, permitividad del vacío, velocidad de la luz, carga específica del electrón... Todas estas constantes constituyen, dentro de la Física, enunciados de

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Incluyo al científico **C** en el proceso porque realiza varias decisiones sobre la manera de tratar al fenómeno **F**. En primer lugar, puede llevar a cabo él mismo las mediciones de **D**, escogiendo para ello un sistema de coordenadas y una escala donde referir los datos, así como los aparatos adecuados y los márgenes de error en las mediciones; **C** puede también escoger los enunciados teóricos aceptados, los que pertenecen a **T**, o puede decidir utilizar otros principios no conectados con los enunciados que se consideraran verdaderos de **T**, y que pertenecen a un grupo de hipótesis provisionales **H**. Más importante aún, el científico parte de cierto margen de error que sería aceptable para la resolución del problema. Es decir, que la decisión sobre qué enunciados teóricos se aceptan depende en buena medida de una precisión a partir de la cual puede considerar que el modelo es más o menos satisfactorio o apropiado³⁷.

T son los principios teóricos que se consideran verdaderos, y constituyen la base primordial para la modelización. En todo modelo hay hipótesis, bien sean enunciados provisionales tomados de un conjunto **H** de hipótesis, o enunciados de **T**, directamente derivados de una teoría a la que se considera verdadera.

T es una estructura jerárquica deductiva donde los teoremas se desarrollan a partir de una serie de axiomas, principios, enunciados o leyes de alto grado de abstracción. Los teoremas se deducen con ayuda de una serie de hipótesis auxiliares, suposiciones, simplificaciones o aproximaciones sobre la naturaleza particular de los fenómenos. El modelo, normalmente, surge de la aplicación de las leyes más generales a los casos más sencillos, o del análisis del fenómeno descomponiéndolo en los casos donde se cumplan las condiciones especificadas en la teoría.

La teoría, como conjunto de enunciados considerados verdaderos, es el fundamento de los modelos que realiza una determinada comunidad científica. En este sentido, constituye el *segundo grupo de enunciados aceptados*, los teóricos.

Una teoría, cuando actúa como principio para la construcción del modelo, es un conjunto de *reglas metodológicas*, un patrón a seguir para su confección, una *guía* en la

observación aceptados, **D**, y pueden figurar como condiciones iniciales en cualquier problema para el que sea preciso construir un modelo.

³⁷ **C** puede todavía desempeñar más papeles: como matemático, tratando de encontrar una fórmula que genere los datos de observación, o resolviendo aproximadamente las ecuaciones del modelo, creando un algoritmo de interpolación, por ejemplo; o puede realizar la comprobación del modelo en un experimento, modificando él mismo el modelo y proporcionando nuevas versiones del mismo.

I. HACIA UNA ELUCIDACIÓN DE LA PALABRA “MODELO”

representación del fenómeno. Las diferentes teorías, cuando compiten, constituyen diferentes propuestas de acercamiento a un mismo fenómeno, al que interpretan de forma diferente.

Es decir, que, dado un fenómeno natural, supuesto que sea reducible a un esquema básico de comportamiento, y reducido a una serie de variables relevantes, el modelo parte de la realidad física de ese fenómeno, tal como se da en la experiencia a través de una serie de medidas, y lo reconstruye atendiendo a la forma en que esas variables dependen y se condicionan entre sí.

El modelo hace mucho más que resumir el conjunto de datos experimentales, los *sintetiza*, les da una unidad a través de una ecuación que informa de cuál es el comportamiento físico de las magnitudes físicas que están en juego. Las variables representan mediante símbolos estas cantidades, y están dirigidas siempre a un proceso de medida, de asignación de un número seguido de unas unidades, por lo que nunca resultan conceptos vacíos.

El modelo es el objetivo final de la investigación científica; es lo que permite predecir y anticiparse a las observaciones. Su estructura se levanta a partir de unos principios teóricos básicos a los que se les añade una serie de condiciones iniciales, de contorno o de periodicidad que adaptan la teoría al problema particular que se quiere resolver.

En la *Figura 1.3* he representado un mapa conceptual donde se aprecian los elementos de la modelización. Utilizando un lenguaje aristotélico, denomino a la teoría “causa formal” porque considero que proporciona a los datos experimentales del fenómeno (la “causa material”) la forma a la que (más o menos) responden. La “causa eficiente” sería el científico, como agente que lleva a cabo el proceso, mientras que la “causa final” sería el objetivo del proceso, el modelo, como *τέλος*.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

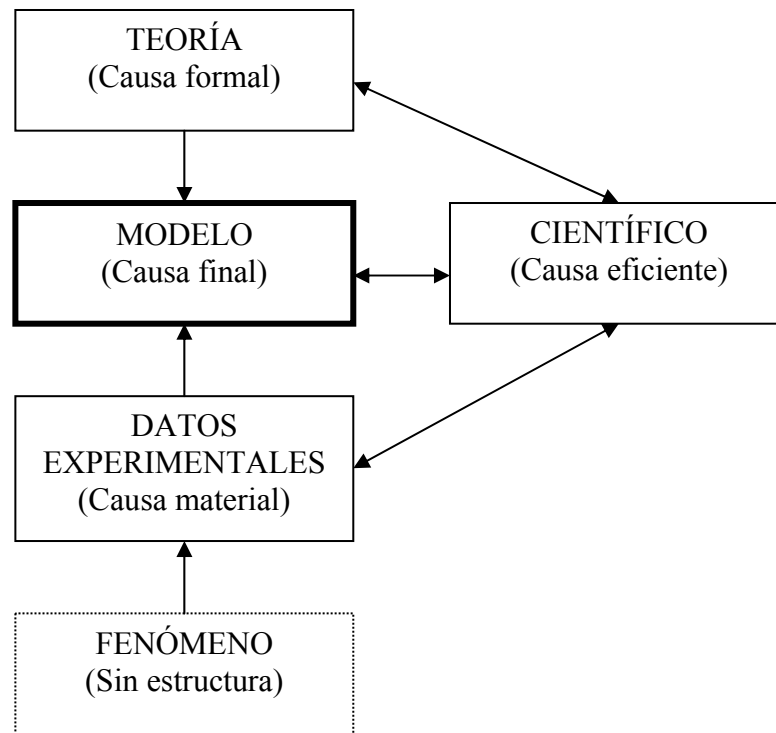


Figura 1.3

Como ilustración, escogeré un ejemplo que se encuentra en Marcellán, Casasús & Zarzo (1991, p. 21). Supongamos que queremos calcular la antigüedad de un cráneo que contiene una tercera parte del carbono C^{14} que se encuentra en un hueso de un hombre en la actualidad. Dado este problema inicial, y sabiendo que la cantidad de isótopos radiactivos C^{14} se mantiene constante en un organismo vivo, se puede construir un modelo sencillo a partir de la siguiente hipótesis:

H.1.: La cantidad de átomos que se desintegran es proporcional a la cantidad de átomos presentes. Lo que significa, expresado en forma matemática:

$$\frac{dN(t)}{dt} = -k \cdot N$$

donde $N(t)$ es el número de átomos presentes en el instante t , y k es la constante de decaimiento, aproximadamente igual a 0,000126 para el C^{14} .

I. HACIA UNA ELUCIDACIÓN DE LA PALABRA “MODELO”

Si N_0 es la cantidad de átomos que el hombre tenía al morir, en el instante en que el tiempo $t = 0$, el modelo está formado por una ecuación lineal de primer orden proporcionada por la hipótesis H.1. y por unos valores iniciales:

$$\frac{dN(t)}{dt} + k \cdot N = 0, \quad N(0) = N_0$$

Integrando,

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-kt}$$

Cuando el cráneo tiene $N_0/3$ átomos de C^{14} , la ecuación queda como:

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-kt} = \frac{N_0}{3}$$

Y el tiempo transcurrido se obtiene despejando t :

$$t = \frac{\ln 3}{k} \cong 8719 \text{ años}$$

Por supuesto, las ecuaciones pueden resultar mucho más complicadas, como ecuaciones de orden superior, con coeficientes periódicos o en derivadas parciales, en cuyo caso habrá que preguntarse por la existencia y el número de soluciones que resuelven la ecuación, y por los distintos métodos numéricos de aproximarse a los problemas de los valores iniciales. En cualquier caso, lo importante es la descripción física del fenómeno que proporcionan las ecuaciones, a partir de las hipótesis teóricas y las condiciones físicas donde se estudia el caso.

Las ventajas de considerar el predicado “modelizar” como una relación poliádica entre cuatro elementos (**D**, **C**, **T**, **M**) creo que son muchas. En primer lugar, no se compromete con la verdad de la teoría **T** o del conjunto de hipótesis **H**. De momento, sólo pretendo destacar la *necesidad instrumental* que la ciencia tiene de estos conjuntos a la

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

hora de utilizarlos para la representación de un fenómeno natural, es decir, como principios que figuran a la cabeza de todas las demostraciones, explicaciones y predicciones.

En cualquier caso, los enunciados de un alto nivel de abstracción presentes en **T**, y que son considerados verdaderos, es decir, leyes, por una comunidad científica, son también hipótesis, aunque muy difíciles de llegar hasta ellas para hacerlas falsas. En **T** se encuentran los principios básicos para la construcción de modelos que se llevan a cabo diariamente en cientos de laboratorios del mundo. Esto indica que, aunque no puedan verificarse, y nada nos asegure que algún día puedan llegar a ser considerados no verdaderos, o aproximaciones dentro de una teoría de nivel superior, son constantemente utilizadas para la representación de fenómenos en todos los campos de la Física, demostrando su efectividad una y otra vez.

Con la introducción del conjunto de hipótesis **H**, distinto a **T**, sólo quiero indicar la posibilidad de modelizar un fenómeno mediante leyes o fórmulas empíricas que aún no se han integrado en **T** porque no han sido derivadas a partir de sus leyes fundamentales. En este caso, y como veremos en el Capítulo II, **H** es capaz de salvar las apariencias sin someterse a la disciplina de **T**, aunque quede a la espera de que se produzca su incorporación al conjunto de enunciados verdaderos derivados a partir de **T**.

Así, la única línea que de momento establezco entre los modelos como representación es aquella que separa un modelo meramente empírico (o modelo de datos), construido para dar cuenta de una serie de datos experimentales, **D**, a partir de hipótesis **H**, y otro modelo derivado directamente de las leyes fundamentales de **T**, en cuyo caso no sólo estaría justificado empíricamente, es decir, que salvaría las apariencias, sino teóricamente, pues su validez vendría avalada por la “verdad” de las premisas más altas y abstractas, leyes a las que la ciencia considera los pilares de todo su conocimiento.

Esta noción de la palabra “modelo”, como representación que sintetiza la información disponible sobre un fenómeno a partir de una serie de hipótesis o de una serie de enunciados verdaderos, recoge los significados con que se utiliza en Física, donde el predicado “modelo” se asigna tanto a la representación que Bohr hizo del átomo, a partir de hipótesis tomadas de distintas áreas de la Física, algunas de ellas en contradicción con los enunciados de **T**, como a la representación mucho más elaborada y justificada de Schrödinger o Heisenberg. Así, se habla de modelos relativistas cuando se quiere indicar que la representación ha sido construida a partir de las leyes de la Teoría de la Relatividad, o de modelo cuántico cuando los principios que dirigen la construcción se

I. HACIA UNA ELUCIDACIÓN DE LA PALABRA “MODELO”

basan en la Teoría Cuántica. No importa entonces que el modelo sea generado todo él a partir de una teoría en el sentido clásico y fuerte de la palabra: sigue siendo un modelo, una representación, aunque no esté formado por leyes de bajo nivel y en principio haga algo más que “salvar las apariencias”.

Porque cuando se habla de un modelo mecánico se dice que está construido a partir de las leyes de la Mecánica, y no necesariamente por fórmulas empíricas, o por leyes de alcance limitado. También se habla de modelos electromagnéticos para indicar lo mismo, o de modelos newtonianos, o del modelo de Sommerfeld, o de un modelo vectorial que representa las propiedades del impulso angular orbital, o de un modelo de electrón, o del Universo, o del núcleo. En todos estos casos, la palabra se utiliza *no* para referirse al sistema realizado, sino a la representación, al dibujo, al esquema, al diseño, a la idea, a la imagen (*Bild*), y *tampoco* se menciona en ningún momento el grado de abstracción o de verdad que hay en las leyes que lo levantan. Ésa es otra cuestión. Lo único que está mencionado es el conjunto de enunciados teóricos que lo han construido, no su alcance. En definitiva, las ecuaciones de Maxwell tienen muchísimos modelos, tantas como las veces que los científicos acudan a ellas o a sus consecuencias para representar un fenómeno.

En este sentido, y volviendo al inicio del capítulo, el significado fundamental de la palabra “modelo”, en ciencia empírica, no sería “el objeto con características únicas”, ni “el arquetipo para imitar o reproducir”, sino el de forma o manera de ser, de acuerdo a unos principios o criterios. Una serie de modelos sería un conjunto de objetos *construidos* con arreglo a un mismo diseño, a un mismo patrón, a un mismo corte; y eso es lo que le proporciona la teoría, *sin que llegue a confundirse con ella ni resulte una realización suya*. La modelización de la naturaleza no tiene que implicar, en principio, que deje de teorizarse sobre ella; más bien, casi parece lo contrario. La teoría, como conjunto de principios elaborativos, como instrucciones para la obtención de modelos, no parece quedarse atrás en este proceso, y cabría preguntarse hasta qué punto sería posible sin él³⁸.

³⁸ La propia expresión, “modelo teórico”, con la que se designa a los modelos de la ciencia empírica, sugiere una estrecha relación entre los modelos y las teorías, sin que en principio lleguen a confundirse.

1.5. El modelo como síntesis explicativa

Esta noción de la palabra modelo, como la decisión que un científico toma sobre los enunciados teóricos que va a utilizar, a la vista de los datos de observación disponibles, y de acuerdo a cierta precisión (o tolerancia en el error) que sería aceptable para el científico en la resolución del problema, nos acerca a lo que Rivadulla (2004, pp. 68-87) entiende por “explicación teórica”, para diferenciarla de la “explicación real”, que nos mostraría la verdadera estructura del mundo. La explicación, en Física, consistiría en derivar el *explanandum*, lo que ha de ser explicado, a partir de una serie de leyes y condiciones iniciales que forman el *explanans*.

En Hempel (1988, p. 249), la explicación se concibe como un razonamiento según el cual la descripción del fenómeno que se quiere explicar, *explanandum*, es deducido a partir de ciertos hechos explicativos. Estos pueden clasificarse en dos grupos: a) hechos particulares, y b) uniformidades expresables por medio de leyes generales.

La explicación es un razonamiento deductivo de la forma:

$$\begin{array}{r}
 C_1, C_2, \dots, C_k \\
 L_1, L_2, \dots, L_r \quad (\textit{Explanans}) \\
 \hline
 E \quad (\textit{Oración explanandum})
 \end{array}$$

C_1, C_2, \dots, C_k son oraciones que describen las condiciones antecedentes específicas. L_1, L_2, \dots, L_r son las leyes generales sobre las que descansa la explicación.

La explicación debe someterse a ciertas condiciones de adecuación. Por un lado, las condiciones lógicas de adecuación especifican:

(R1) El *explanandum* tiene que ser una consecuencia lógica a partir de la información suministrada por el *explanans*.

(R2) El *explanans* debe contener leyes; es decir, teoremas de una teoría.

(R3) El *explanans* tiene un contenido empírico, tal que puedan comprobarse experimentalmente sus afirmaciones.

Por otro lado, la explicación debe ser *adecuada empíricamente*, mediante la siguiente condición:

I. HACIA UNA ELUCIDACIÓN DE LA PALABRA “MODELO”

(R4) Los enunciados del *explanans* han de ser verdaderos: sus contenidos deben ser altamente confirmados con la información que la ciencia disponga hasta la fecha.

Esta última parece ser la regla más polémica de adecuación. Históricamente, muchos enunciados han sido considerados verdaderos y más tarde se ha descubierto, desde la propia ciencia, su falsedad. Un enunciado como “En una reacción química, la suma de las masas de los reactivos es igual a la suma de las masas de los productos” (ley de Lavoisier, de 1774), con el que tantísimos hechos se explicaron (y se siguen “explicando”, para reacciones donde no se aprecia la violación del principio) es hoy rechazado por la Teoría de la Relatividad, que ha demostrado la conversión de masa en energía, por ejemplo, en los procesos nucleares. La introducción de la cláusula “con la evidencia disponible hasta la fecha”, supone el reconocimiento de que el conjunto de enunciados teóricos aceptados, **T**, puede variar y precisarse, y que su función de verdad no arroja un 1 o un 0, según su total adecuación o falta de adecuación a los hechos, sino que depende del contexto histórico de una comunidad determinada de científicos, por cuanto la verdad es una cuestión de precisión, que presumiblemente aumenta con el tiempo.

Dado el esquema explicativo fundamental, la diferencia entre explicar y predecir es de carácter práctico. Si tenemos evidencia de *E*, y luego proporcionamos C_1, C_2, \dots, C_k y L_1, L_2, \dots, L_r , hemos explicado la ocurrencia de *E*. Si el mismo hecho *E* es inferido a partir de las oraciones del *explanans*, hablamos de predicción.

Como es sabido, este tipo de explicación cuya estructura lógica está indicada por el esquema (**D-N**) se denomina explicación *deductivo-nomológica*, pues realiza una subsumición³⁹ del *explanandum* bajo principios que tienen el carácter de leyes generales. El razonamiento demuestra que, dadas las circunstancias particulares y las leyes en cuestión, la aparición del fenómeno era de esperar, y de ahí el sentido según el cual la explicación nos permite comprender por qué se produjo el fenómeno.

La explicación de Hempel tiene el gran mérito de reducir la explicación a una *demonstración*. Explicar un hecho es demostrar que se sigue a partir de una serie de enunciados aceptados. Yo divido estos enunciados aceptados en dos grupos: a) enunciados

³⁹ Prefiero esta palabra a otras traducciones como “subsunición” (?). “Subsumir”: De *sub-* y la palabra latina *sumĕre*, “tomar”. Literalmente, “tomar lo que está por debajo”. Según el DRAE, “incluir algo como componente en una síntesis o clasificación más abarcadora”, y (2) “considerar algo como parte de un conjunto más amplio o como caso particular sometido a un principio o norma general”.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

teóricos, leyes o hipótesis, ecuaciones que ligan propiedades físicas; y b) enunciados de observación, que asignan un número a ciertas cantidades que se suponen conocidas. No es difícil de ver, entonces, que básicamente coincido con Hempel en su idea de la explicación. Dado un hecho aceptado, expresado como un enunciado de observación, explicarlo no es más que subsumirlo en leyes y condiciones que sean capaces de concluirlo en un argumento lógico.

Por otra parte, ya que también defiendo que el modelo es una serie de ecuaciones más una serie de enunciados de observación, lo que hago es identificar el *explanans* de Hempel con el modelo. Así, los modelos son tentativas de aproximación a los fenómenos, explicaciones más o menos provisionales que se utilizan para derivar conclusiones físicas que, o bien quieren explicarse, o bien quieren predecirse. Es decir, que *un modelo es un explanans*, la serie de ecuaciones necesarias para poder explicar y predecir fenómenos.

Pero veámoslo más claramente. Para explicar un fenómeno se parte de ciertas medidas m_1, m_2, \dots, m_n . A continuación, si estamos en el contexto de descubrimiento, se busca una función matemática capaz de subsumir los datos empíricos que se consideran verdaderos. Si se consigue, como en el caso de los modelos astronómicos de Ptolomeo o del modelo de caída libre de Galileo⁴⁰, tenemos una explicación que salva las apariencias. Si el modelo, aplicado a un fenómeno en particular, es capaz de explicar los datos que se poseían con anterioridad, es porque se ajusta más o menos a los datos experimentales, dentro de un margen de error o tolerancia que se supone más o menos aceptable. El modelo, en un primer momento, si ha salvado las apariencias, y devuelve para la variable dependiente valores parecidos a las medidas realizadas con anterioridad, ha sido capaz de proporcionar una explicación, en el sentido de que es capaz de *computar* los datos originales de observación.

Se dice entonces que el modelo es “adecuado” o “aceptable”, que “funciona”, o que es un buen instrumento, porque no sólo es capaz de derivar matemáticamente los datos originales, sino que además va más allá y permite predecir toda una serie de nuevas medidas m_1', m_2', \dots, m_n' . El modelo es un buen instrumento porque no sólo explica, no sólo subsume datos ya conocidos; además, predice, y no hay límites matemáticos para sus predicciones. Después, parte de sus predicciones, aquellas que son accesibles

⁴⁰ Cf. Cap. II y Cap. VI.

I. HACIA UNA ELUCIDACIÓN DE LA PALABRA “MODELO”

técnicamente, se comprueban y se someten a prueba. La adecuación de sus predicciones dependerá, entre otras cosas, de la precisión de la medida de la época. El modelo puede modificarse, y nunca resulta definitivo. Correcciones posteriores pueden tener en cuenta nuevas medidas, o nuevas teorías. En este sentido, el modelo nunca es verdadero, porque su adecuación nunca es total, y siempre es aproximada. El instrumentalismo tiene razón aquí.

Hempel pensaba que si el *explanans* de una explicación **D-N** era verdadero, es decir, si la conjunción de sus oraciones constituyentes era verdadera, la explicación era verdadera. Una explicación está más o menos justificada según la confirmación empírica de los elementos del *explanans*. La explicación verdadera necesita, evidentemente, enunciados verdaderos, *leyes*. Pero, ¿qué ocurre si desconocemos el valor de verdad de los enunciados que forman el *explanans*? En lo que Hempel llamaba *explicación potencial D-N*, las oraciones que constituyen el *explanans* no necesitan ser verdaderas. L_1, L_2, \dots, L_r serán oraciones legales, también llamadas *nómicas* o *nomológicas*.⁴¹

Nosotros podemos olvidarnos de esta distinción entre explicaciones verdaderas y potenciales, y afirmar, directamente, que *no hay explicaciones verdaderas*, no sólo porque las leyes no sean verdaderas para siempre, sino porque una explicación, en principio, no es una oración, sino un *argumento*, y en el caso de las explicaciones **D-N**, un argumento claramente deductivo. Los argumentos no son verdaderos ni falsos, sino válidos o inválidos, porque atienden a la forma lógica, no al contenido de sus premisas. Únicamente afirman que, en caso de que las premisas sean verdaderas, las conclusiones no pueden ser falsas. Igualmente, si la conclusión es falsa, señalan que alguna de las premisas es también falsa.

⁴¹ Las oraciones legales pueden adoptar formas lógicas diferentes. A partir de los análisis de Goodman (1995), Hempel (1988, pp. 334 y ss.) señalaba algunos criterios para distinguir este tipo de oraciones:

- 1) Pueden dar origen a enunciados condicionales contrafácticos y subjuntivos.
- 2) No deben estar limitadas a un número finito de casos; deben tener una forma esencialmente general.
- 3) No han de referirse a ningún objeto o localización particular.
- 4) Son proyecciones de casos examinados a casos no examinados. La proyectabilidad relativa de las generalizaciones está determinada por el *reforzamiento* (*entrenchment*) relativo de sus predicados constituyentes, es decir, por la medida en la cual esos predicados han sido usados en generalizaciones proyectadas previamente.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Un modelo es adecuado o no adecuado, útil o inútil, apropiado o no apropiado, porque fundamentalmente es un *conjunto de premisas* que permite derivar una conclusión. Por eso hablamos de la adecuación de un modelo, más que de su verdad: porque forma parte de un argumento, de una demostración, como un *explanans* que es adecuado o no para derivar cierto *explanandum*. Lo que realmente cuenta de un modelo, entonces, es su *capacidad deductiva, ya sea para predecir, ya sea para explicar*.⁴²

La ciencia explica (teóricamente) por medio de modelos. Los modelos son premisas para la conclusión de lo que quiere demostrarse. Los modelos son creados específicamente para explicar un conjunto de enunciados considerados verdaderos. Pero una vez que explican, se ponen a predecir, porque básicamente son fórmulas matemáticas. Es decir, que hacen algo más que explicar y resumir, y ahí radica su efectividad.

Supongamos una serie de medidas m_1, m_2, \dots, m_n , para las que se busca una explicación. Un científico propone un modelo M capaz de generar (más o menos) esas medidas. Sea ahora m_1', m_2', \dots, m_n' el conjunto de predicciones del modelo M que la ciencia de una época, a partir de la resolución de sus instrumentos de medida, es capaz de comprobar. *En el caso de que las predicciones se confirmen, el modelo M sigue explicando más allá de donde fue concebido*. Si el modelo es exitoso la explicación no se detiene en los datos originales, sino que amplía su alcance hacia otros dominios, donde sigue funcionando, donde sigue demostrando que es un buen instrumento. M ha comenzado explicando m_1, m_2, \dots, m_n , pero ahora, si se confirman sus predicciones, sigue explicando las nuevas medidas m_1', m_2', \dots, m_n' , resultado de la investigación de sus predicciones.

Como vemos, explicación y predicción van de la mano, como pensaba Hempel, pero son dos cosas distintas: *las predicciones son números que arroja el modelo matemático; las explicaciones subsumen (deducen) medidas efectivas sobre la realidad*. De su cotejo, el modelo saldrá airoso o no. En un primer caso, se seguirá probando en otros

⁴² Como vimos en la sección § 1.2, los estudios semánticos introducen la verdad material en los sistemas sintácticos. Mediante el (meta) teorema de deducción podemos pasar de la validez de un argumento a la verdad de la proposición que expresa dicho argumento, de la siguiente forma: Si $\alpha \vdash \beta$ es una secuencia deductiva en S_{ax} , $\vdash \alpha \rightarrow \beta$ es una tesis o una proposición demostrable de S_{ax} , donde S_{ax} es un sistema axiomático. Véase Vega (1987, pp. 122 y ss.). Sin embargo, en ningún caso puede afirmarse la verdad de α . Eso tiene que ser averiguado por métodos empíricos. Y aquí la verdad o falsedad es sólo provisional, aproximada... *Pero hay "verdades" más provisionales que otras...*

I. HACIA UNA ELUCIDACIÓN DE LA PALABRA “MODELO”

dominios, ya que las cantidades físicas fundamentales se siguen refiriendo a lo mismo; en un segundo caso, el modelo se corregirá, ampliará, o sencillamente se rechazará.

La explicación parte siempre de una serie de enunciados que la ciencia considera verdaderos. Estos enunciados son anteriores a la explicación, y constituyen el punto de referencia a partir del cual se edifica el *explanans* en cuestión. Ahora bien, ¿la ciencia considera verdaderos solamente enunciados de observación, **D**, o también considera verdaderos un conjunto de enunciados teóricos, **T**, como yo defiendo? En tal caso, *la explicación no puede ceñirse solamente a explicar “hechos”, sino que ha de abarcar también otros enunciados científicos, como modelos de datos, leyes, o teorías*. Así piensa Rivadulla (2004, Cap. II), y por eso está en lo cierto al señalar que la explicación teórica deriva matemáticamente no sólo hechos de experiencia, sino fórmulas empíricas, leyes de distinta generalidad e incluso las propias teorías científicas. La explicación tiene que ver con la *fundamentación*, y es relativa al nivel donde nos encontramos. Un modelo de datos salva las apariencias y, a su manera, explica; pero un científico teórico puede considerar esto insuficiente y puede tratar de derivarlo a partir de enunciados teóricos más abstractos, pertenecientes al cuerpo de enunciados aceptados teóricos, **T**. Si lo logra, estaría explicando el modelo de datos a partir de leyes más abstractas y fundamentales. Esta explicación *fundamentaría* el modelo de datos, y lo haría parecer más racional, porque formaría parte del conjunto de modelos que pueden ser derivados a partir de **T**.

La pregunta fundamental es: *¿a partir de qué premisa se considera el modelo lo suficientemente fundamentado?* Si no hay jerarquía de leyes, y la ciencia es poco más o menos que un caos de donde uno toma lo que le interesa, la explicación no tendría ningún sentido; bastaría con tomar cualquier hipótesis y deducir la conclusión-*explanandum*. Pero como la ciencia tiene una jerarquía en sus leyes, por eso tiene sentido la explicación, y por eso se busca siempre la derivación final a partir de las leyes fundamentales, que actúan como los pilares de toda la ciencia. La derivación matemática tiene que tener un principio, y ese principio ha de estar situado en los principios fundamentales físicos de la ciencia; de otra manera, el modelo estaría justificado sólo empí-

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

ricamente, pero no teóricamente, y no tendría relación alguna con el resto de modelos científicos utilizados en otros campos y que tan buenos resultados ofrecen⁴³.

Negar que haya dos tipos de justificación, empírica y teórica, significa desconectar los departamentos de la ciencia, y aislarlos entre sí. Rechazar la correspondencia entre modelo y realidad, ser un instrumentalista en este punto, no significa aceptar que “todo vale”, o que la modelización puede efectuarse de cualquier manera. Existen unas reglas básicas para la formación de los modelos, y esas reglas metodológicas no son más que las propias leyes científicas, las cuales están fuertemente jerarquizadas. Explicar algo es deducirlo a partir de los primeros principios, para fundamentarlo, para no dejarlo aislado, para unificar el *corpus* científico total. Al igual que la verdad es una cuestión de precisión, y tiene grados, también la explicación va por grados, dependiendo del nivel a partir del cual sean derivados los modelos. Ésta es la razón de que haya unos modelos más justificados que otros, más fundamentados teóricamente, y de que no todos rayen al mismo nivel, ni sean igualmente preferibles.

Por eso rechazo que la diversificación sea la característica esencial de la ciencia. En todo caso, será una de sus características fundamentales, pero no la única. La unificación es la otra de las características esenciales. Una organización piramidal no tiene por qué prohibir la diversificación; al contrario, ésta es asegurada a partir de la unidad del sistema. Con ello no hago más que repetir una de las tesis de Kant, quien había afirmado que el objetivo de la ciencia es una exigencia de la razón, que organiza el material proporcionado por los datos empíricos. La ciencia es un sistema donde todo está conectado, y ninguna parte es más importante que otra⁴⁴.

Entiendo por arquitectónica el arte de los sistemas. [...] la unidad sistemática es aquello que convierte el conocimiento ordinario en ciencia, es decir, lo transforma de mero agregado de conocimientos en un sistema [...] Regidos por la razón, nuestros conocimientos deben formar un sistema [...] Por sistema entiendo la unidad de los diversos conocimientos bajo una idea [...] El todo está, pues, articulado (*articulatio*), no amontonado (*coacervatio*). Puede crecer internamente (*per intus susceptionem*), pero no externamente (*per appositionem*).

⁴³ Como veremos en el Capítulo III, dedicado a los Modelos de Mecánica Clásica, la función de verdad (=1), convencionalmente aceptada, de las tres leyes de Newton, pasa a través de las simplificaciones, aproximaciones y correcciones por los distintos modelos que la teoría va fundamentando.

⁴⁴ El texto corresponde a la versión española de Alfaguara, traducción de Pedro Ribas, 1997, decimotercera edición.

I. HACIA UNA ELUCIDACIÓN DE LA PALABRA “MODELO”

La cita de Kant corresponde a A 832-834 B 860-862, y resume cuál es el objetivo de la ciencia: la *sistematización* de los hechos conocidos; “sistematizar” no significa dar un mero listado de hechos. Esto exige una jerarquía de leyes donde unas se derivan de otras, pero mediante postulados físicos, atendiendo al contenido de las premisas, mediante sucesivas aproximaciones. Es decir, la razón ordena deductivamente la serie de modelos que sintetizan el comportamiento de los fenómenos, poniendo en correspondencia unos con otros, y no dejándolos aislados constituyendo meros agregados.

Por eso son tan fundamentales las leyes científicas, y por eso son algo más que generalizaciones de hecho; en todo caso, serían *totalizadoras* de hechos, aunque la palabra suene algo brusca. Lo que quiero decir es que una ley, un principio formativo de un modelo, es algo más que un resumen de hechos, es una síntesis de la información concerniente a los casos que caen bajo la ley. La ley sintetiza la información disponible hasta la fecha sobre cómo se relacionan entre sí ciertas magnitudes físicas. Y porque no es solamente una generalización de hechos, va a poder aplicarse después a otros hechos, va a poder alcanzar otros ámbitos distintos a los específicos para los que fue diseñada: en eso consiste su carácter universal, en ser una *síntesis*.

En A 654-655 y en B 682-683 leemos:

La razón manifiesta aquí dos intereses contrapuestos: por una parte, el interés de la *extensión* (universalidad) respecto de los géneros y, por otra, el del *contenido* (concreción) respecto de la diversidad de las especies; mientras que en el primer caso el entendimiento concibe mucho *bajo* sus conceptos, en el segundo piensa más *en* ellos. Ello se pone igualmente de manifiesto en los modos de pensamiento, tan diversos, de los investigadores de la naturaleza. Algunos de ellos (los preferentemente especulativos) son, por así decirlo, enemigos de la heterogeneidad y persiguen siempre la unidad de género. Otros (las cabezas preferentemente empíricas) tratan incesantemente de dividir la naturaleza en tal diversidad, que casi hacen perder la esperanza de apreciar sus fenómenos a la luz de principios universales.

Este último modo de pensamiento se basa también, evidentemente, en un principio lógico que tiende a completar de manera sistemática todos los conocimientos: cuando, arrancando del género, descendemos a la diversidad que puede hallarse contenida en él, tratamos de dar extensión al sistema, al igual que en el primer caso, cuando ascendíamos al género, tratábamos de darle unidad.

Si por una parte, la investigación científica dirige sus esfuerzos a encontrar nuevas conexiones entre hechos, hacia nuevos descubrimientos sorprendentes que precisen más el sistema, también, por otro lado, la ciencia busca la sistematización de todo lo conoci-

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

do en un orden superior tal que el *corpus* científico constituya un conjunto ordenado y articulado en la unidad de los modelos que utilizan.

Por eso los modelos pueden ser de bajo nivel como de alto nivel; es decir, que no tienen por qué estar asociados a un conjunto limitado de fenómenos. Puede haber, y de hecho hay, modelos altamente abstractos que no dejan de referirse a la realidad en ningún momento. Los modelos no pierden contacto con la realidad cuando suben hasta las eigenfunciones, por ejemplo; y desde luego, siguen siendo Física, antes que Matemática⁴⁵.

A partir de los modelos más abstractos pueden derivarse los casos particulares simplificando las situaciones experimentales características de los diversos fenómenos. Pero particularizando no ganamos más información de la que, directamente, proporcionan las leyes de Maxwell, por ejemplo. Éstas no viven en un mundo metafísico aislado: de hecho, son el *fundamento* de los teoremas que se siguen de ella. Las grandes teorías explicativas contienen más información física que cualquier modelo que utilice directamente las leyes de Kirchoff, por ejemplo. Constituye un error contraponer las leyes de bajo nivel a las más altas, como si éstas se dedicaran únicamente a poner un nombre más genérico a todas las situaciones particulares. No: los modelos se forman también en esas regiones teóricas de altitud, tienen que formarse, para, a partir de aquí, deductivamente, tras las condiciones iniciales y las suposiciones, bajar hasta los hechos, hasta los enunciados de observación aceptados, y calcular, por ejemplo, la masa o el espín del electrón, la solubilidad del sulfato de calcio en agua, o la constante cosmológica de Einstein.

Además, creer que la ciencia progresa no significa creer que tenga un final, una meta objetiva, sino que las nuevas leyes precisan el contenido de las anteriores, haciendo ver dónde y cuándo fallaban, cuáles eran sus límites. Efectivamente, las leyes dejan de ser verdaderas, pero conservan las situaciones experimentales donde eran “verdaderas”, donde tenían sentido. La nueva teoría modifica el contenido de la antigua hasta el punto de que *nunca* puede derivarse de ella lógicamente o matemáticamente (sin simplificaciones que no pueden ser axiomatizadas), pero eso no significa que la nueva teoría no pueda explicar la racionalidad de la teoría anterior para dar cuenta de aquel conjunto de

⁴⁵ Esta tesis doctoral expresará el convencimiento de que las teorías físicas no son divisibles en componentes matemáticos, lógicos o analíticos, a los que se superponen elementos puramente físicos. Es decir: *toda la matemática que cabe en una teoría tiene un significado físico.*

I. HACIA UNA ELUCIDACIÓN DE LA PALABRA “MODELO”

hechos que la hicieron “verdadera”. La racionalidad en ciencia, no es sólo empírica, hacia abajo, sino también teórica, hacia arriba. Ahí está la Historia de la Ciencia para comprobarlo.

1.6. Recapitulación

La semántica, entendida como la teoría de la referencia del vocabulario extralógico de un sistema axiomático de primer orden, nunca nos aclarará cuál es el sentido de una ley física, incluso de la más sencilla de ella. Las conectivas lógicas extensionales no captan el significado de “causar”, como tampoco captan el de “tender”. Son otras cosas las que están en juego: los sistemas físicos no son reducibles a sistemas lógicos; son algo más, son relaciones de distinta naturaleza. No es posible reducir una teoría física a una lógica de primer orden.

Porque las dificultades no son sólo simbólicas, sino que afectan al objetivo principal de la Metodología Científica: elaborar un análisis lógico del lenguaje científico tal y como se produce en realidad. Pero un examen superficial basta para comprender que un sistema axiomatizado, por muy interpretado que esté, no genera todos los enunciados científicos. Para obtener el Teorema de Torricelli, por ejemplo, hace falta añadirle algo a las ecuaciones fundamentales de la Hidrodinámica. Hay que aplicar las leyes fundamentales a casos más concretos, y *la serie de suposiciones, aproximaciones, transformaciones e hipótesis físicas no pueden ser axiomatizadas de una vez para siempre*, sino que es algo que se va haciendo de acuerdo con la naturaleza de los problemas y fenómenos que se estudian.

Es necesario elaborar una noción de modelo que resalte su carácter de representación, de esquema, de síntesis, y no de realización, y que nos permita explicar por qué un mismo fenómeno puede ser esquematizado de distintas maneras, mediante sistemas equivalentes, y todos ellos complementarios y compatibles. Así, antes de establecer cualquier tipo de taxonomía es preferible partir de una noción más general de la palabra “modelo” que simplifique la enorme variedad de su uso y que caracterice el proceso de modelización, comparándolo con el de teorización. Las relaciones entre teoría, modelo y datos de observación, son resueltas, provisionalmente, considerando que el modelo es una *decisión sobre dos grandes grupos de enunciados*, los teóricos y los observaciona-

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

les. El científico decide qué enunciados considera verdaderos y establece una serie de *preferencias más o menos justificadas* sobre la importancia y validez de los mismos.

Dentro de los enunciados teóricos, he distinguido entre a) el conjunto de leyes fundamentales que una comunidad científica, en una determinada época, considera verdaderas, y a las cuales acude para construir la gran mayoría de sus modelos; y b) un conjunto de hipótesis que no se deducen directamente de estos enunciados fundamentales, y que funcionan como tentativas provisionales que son capaces de proporcionar, a falta de una teoría sistemática que organice todo el contenido empírico de una serie de fenómenos, cierto control empírico sobre los mismos, cierto poder predictivo que de momento consiga “salvar las apariencias”, quedando a la espera de una posterior justificación teórica. Un modelo puede construirse, entonces, bien a partir de principios teóricos firmes, o bien utilizando una serie de hipótesis no conectadas directa y deductivamente con las leyes fundamentales.

La explicación, en Física, consiste en la deducción de un *explanandum* a partir de ciertas leyes y condiciones iniciales. El modelo es el *explanans*, la serie de ecuaciones necesarias para explicar y predecir fenómenos. Estas ecuaciones se dividen en ecuaciones generales teóricas, leyes o hipótesis, y en datos de observación, mediante los cuales se dan las condiciones iniciales de aplicación de las ecuaciones, asignándose un número a ciertas dimensiones físicas. Las leyes que forman el *explanans*, es decir, las leyes que forman el modelo, no son verdaderas para siempre: pueden precisarse, modificarse, rechazarse o reinterpretarse: no son principios definitivos, y son más o menos aproximadas dependiendo del nivel de resolución de la época que se considere, es decir, dependiendo de lo que una determinada ciencia, en un determinado momento, *pueda medir*.

El modelo es una *síntesis explicativa* que es más o menos *adecuada* según sea su capacidad *deductiva*, su destreza con la que es capaz de derivar las ecuaciones o los datos de observación para los que se busca una explicación. El modelo no es verdadero o falso, sino más o menos aceptable, más o menos útil, según su habilidad para justificar, deductivamente, una serie de enunciados considerados verdaderos. En un primer momento, ante una serie de medidas, el modelo funciona si es capaz de *computar* esos datos originales dentro de un margen de error tolerable. Decimos entonces que “salva las apariencias” porque su función matemática es capaz de generar las medidas haciendo parecer como razonable lo que en principio no tenía ninguna forma o patrón lógico. Pero el modelo es mucho más que eso; su carácter de *instrumento* se manifiesta a la

I. HACIA UNA ELUCIDACIÓN DE LA PALABRA “MODELO”

hora de ir más allá y predecir toda una serie de nuevas medidas, algunas de las cuales serán comprobables, mientras que otras no lo serán, de acuerdo al nivel técnico experimental de la ciencia en ese momento. Si alguna de esas predicciones se confirman, el modelo *sigue explicando* más allá del ámbito particular para donde fue construido, y de ahí su uso como herramienta para la investigación, y no sólo para la justificación.

La ciencia explica por medio de modelos, entendidos como un conjunto de *premisas* (ecuaciones) que se utilizan para demostrar o inferir, con mayor o menor *acierto*, ciertos resultados que se consideran relevantes. Si esos resultados son conocidos, hablamos de explicación; si no se conocen, de predicción. Las explicaciones son básicamente *demostraciones*, y tratan de *subsumir una serie de medidas* efectivas realizadas sobre la realidad o una serie de ecuaciones de distintos niveles de generalidad; las predicciones son apuestas numéricas, valores, que el modelo realiza a partir de sus ecuaciones. En todo caso, se trata de un mismo proceso *deductivo*, que necesita suponer la verdad de ciertas leyes e hipótesis con el fin de que actúen como premisas dentro de un argumento lógico. La aceptabilidad de una ley o una hipótesis se prueba experimentalmente, y entonces hablamos de que existe una justificación empírica, aunque la “verdad” y “falsedad” de una ecuación sea siempre aproximada.

Ya que la ciencia considera verdaderos no sólo datos de observación, sino también enunciados teóricos de mayor o menor generalidad, la explicación no puede ser relativa solamente a “hechos empíricos”, sino que debe ampliarse para que dentro del *explanandum* puedan darse modelos de datos (o fórmulas empíricas), leyes, hipótesis y teorías. Con ello estamos aceptando implícitamente que hay *niveles en la explicación*, según las premisas de las que partamos a la hora de deducir matemáticamente el *explanandum*. Un modelo de datos puede explicar (salvar las apariencias de) una serie de medidas, pero una serie de ecuaciones más generales puede, a su vez, explicar ese modelo de datos, y justificarlo desde un punto de vista teórico, a partir de principios más abstractos y de mayor alcance. Explicar, en este sentido, es *fundamentar*.

La cuestión es: *¿a partir de qué premisas o ecuaciones quedan explicados los modelos?* ¿O da lo mismo? En este último caso, ¿para qué sirve la explicación? La ciencia necesita un conjunto de enunciados teóricos a los cuales se refieran, en último término, las explicaciones. Estos enunciados son los más abstractos posibles, los de mayor alcance, a partir de los cuales se obtengan, potencialmente, todos los demás por derivación matemática, simplificando, ampliando, aproximando y corrigiendo. Estos princi-

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

pios son también provisionales, pero su convencionalidad es mayor, por lo que resultan *menos transitorios* que los demás. Estas ecuaciones son las más “verdaderas” de todas, y su función de verdad (=1), convencionalmente adoptada, baja por todas las ramificaciones hasta alcanzar los modelos de más bajo nivel. Derivar a partir de estos principios teóricos significa justificar teóricamente, y no sólo empíricamente. A igualdad empírica, no todos los modelos son igual de preferibles. Es una cuestión de eficiencia, de economía, de unificación. La racionalidad científica consiste en la unificación y diversificación sistemática a partir de un número reducido de principios.

En definitiva, utilizo la expresión “modelo teórico” para diferenciar los modelos de la ciencia empírica de los modelos puramente lógicos o matemáticos, tal como se utiliza la palabra “modelo” en Teoría de Modelos. Dentro de los modelos teóricos, distingo entre los modelos meramente empíricos, o modelos de datos, y los modelos justificados teóricamente, que no sólo salvan las apariencias, sino que están derivados a partir de los principios fundamentales que la ciencia considera verdaderos.

Pero lo mejor es acudir directamente a una serie de ejemplos tomados de la Física real, donde se comprenderá la diferencia esencial entre ambos tipos de modelos, y las complejas relaciones que se dan entre teoría, instrumentos de medida, datos de observación y modelos empíricos. El Capítulo II analiza la construcción de modelos que no acuden a las leyes fundamentales del cuerpo teórico vigente, sino que, a falta de una teoría aceptable que explique el comportamiento de una serie de fenómenos, se limitan a salvar las apariencias, a predecir, para conseguir, al menos, cierto *control* sobre una parte de la naturaleza. La Historia de la Astronomía nos permite ver claramente la distinción entre modelos meramente empíricos y modelos empíricos justificados teóricamente, al tiempo que arroja luz sobre el debate entre instrumentalistas y realistas.

CAPÍTULO II

EL DEBATE REALISMO *VERSUS* INSTRUMENTALISMO⁴⁶

2.0. Introducción

La ventaja de acudir a la Historia de la Ciencia es que permite ver el uso y desarrollo reales de los conceptos científicos. El objetivo fundamental de este capítulo es mostrar el desarrollo de los modelos astronómicos a partir del problema de los planetas de Platón. Estos modelos no se derivan directamente de leyes fundamentales, pero utilizan hipótesis físicas para su construcción, consistentes con un conjunto de enunciados de observación aceptados.

La Sección 2.1: “Las unidades computables de Platón”, considera el *Timeo* como uno de los libros fundacionales de la ciencia de Occidente. Supone que la naturaleza tiene un orden matemático que es posible descubrir y esquematizar. En mi lectura, la pregunta de Platón significa que los fenómenos que muestran una apariencia desordenada, los “planetas”, pueden reducirse a una serie de movimientos que permitan *computar* su comportamiento errático, para así hacerlo predecible. Desde el principio, se parte de unos datos de observación aceptados, que constituyen el *explanandum* de un argumento explicativo.

La Sección 2.2: “Justificaciones empíricas y teóricas”, se centra más en consideraciones filosóficas que en otras meramente históricas. Un primer análisis muestra las razones por las que Aristóteles no suponía falsos los modelos meramente matemáticos, sino *incompletos*, no derivados a partir de principios físicos fundamentales. Reduzco

⁴⁶ Para la elaboración de este capítulo me han sido de gran utilidad los apuntes recogidos en el Curso de Doctorado “Mundo, verdad y ciencia”, que el Profesor Rivadulla impartió en la Universidad Complutense de Madrid durante el segundo trimestre del año 1999, dentro del programa de doctorado “Lógica, lenguaje y ciencia”. Cf. Rivadulla (2004, pp. 21 y ss).

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

entonces el debate entre realistas e instrumentalistas a una simple cuestión de *justificación teórica*, y no establezco diferencias entre modelos matemáticos y físicos, puesto que todos utilizan la Matemática y tienen como referente último la realidad física. También analizo las complejas relaciones que existen entre los datos de observación y los avances teóricos, y defiendo que la modelización es un *doble proceso de ajuste de la teoría a los hechos y de los hechos a la teoría*: la mejora y revisión de los modelos, a la hora de ajustarse a los datos experimentales, no debe significar perder el control matemático del fenómeno, porque, sencillamente, dejarían de predecir.

En la Sección 2.3: “Un ejemplo de modelo astronómico”, he construido un modelo sencillo de epiciclo y deferente para analizar las características fundamentales de un *modelo de datos*: en primer lugar, se parte de un lenguaje de observación *neutral*, que caracteriza los enunciados aceptados de observación (Tablas Astronómicas, en este caso). Estos datos tienen cierta *fiabilidad*, y se van *precisando* con el tiempo, gracias, en parte, a los avances teóricos. En segundo lugar, el científico busca una *función matemática* que le permita *generar* las posiciones medidas en los datos de observación. Esta función se somete a condiciones matemáticas precisas impuestas por la naturaleza física del fenómeno, y tiene que ser continua y diferenciable, aparte de tener en cuenta otras hipótesis teóricas. *El modelo reconstruye racionalmente la realidad* a partir de una serie de hipótesis, y permite predecir con mayor o menor acierto el comportamiento de un fenómeno, sin que se ajuste nunca del todo. Un modelo describe *idealmente* la realidad, por medio de ecuaciones, y por eso es capaz de predecir.

La Sección 2.4: “Sistemas alternativos de representación”, comienza distinguiendo entre sistemas alternativos equivalentes y sistemas alternativos incompatibles. Los sistemas de epiciclo y deferente, y el sistema de excéntricas de Ptolomeo, así como los modelos no ptolemaicos de los árabes, no pueden considerarse alternativos, puesto que representan el mismo fenómeno con distintas fórmulas matemáticas. También vuelvo a insistir en el *carácter empírico de las idealizaciones de la Física*, y en la racionalidad del proceso científico, al que en esta ocasión concibo a) como deducción de las hipótesis a partir de leyes fundamentales; y b) como inclusión de las hipótesis en principios más generales, hasta que sustituyen a los que hasta entonces se tenían por verdaderos.

2.1. Las unidades computables de Platón

II. EL DEBATE REALISMO *VERSUS* INSTRUMENTALISMO

El debate realismo *vs.* instrumentalismo tiene sus inicios en la Grecia del siglo IV a. de C. Allí Platón se pregunta: “¿Qué movimientos circulares, uniformes y perfectamente regulares hay que admitir como hipótesis (ἐξ ὑποθέσεως) para explicar el movimiento aparente de los planetas?”⁴⁷ Este es el llamado *problema de los planetas de Platón*, y puede considerarse uno de los primeros ejercicios de Matemática Aplicada en la Historia de la Ciencia. La exigencia de Platón trata de reducir los movimientos observados de los planetas a un patrón regular de comportamiento, de manera que una realidad compleja e irregular pueda ser explicada en términos de otros elementos más simples y conocidos. A partir de estos principios podemos reconstruir el movimiento aparente y conseguir parte de la esencia (εἶδος) del fenómeno, una explicación de su comportamiento, salvando las apariencias (σώζειν τα φαινόμενα).

Porque lo que tiene una apariencia múltiple, desordenada, puede descomponerse en otros elementos más simples y regulares. El fenómeno puede reconstruirse entonces atendiendo a un criterio lógico, fundamentado, a partir de unidades de conocimiento. Lo regular explica lo irregular; lo conocido puede explicar lo que todavía permanece desconocido; este es el ideal científico, expuesto por Platón en la mayoría de sus Diálogos.

La teoría (θεωρία) se distingue de la realidad física y pertenece al mundo de las ideas (Ιδέα), desde donde actúa como pauta de comportamiento para las cosas que forman el mundo aparente. Puesto que el mundo se manifiesta racionalmente, de acuerdo a un λόγος, y ya que todas sus partes se entrelazan formando una unidad (μονοειδής), todo cuanto realmente existe se genera, reproduce y corrompe de acuerdo a ciertas leyes que el hombre es capaz de descubrir desde la verdad (ἀλήθεια) de la teoría, que muestra los rasgos esenciales de lo que en apariencia tiene un comportamiento errático y aparece en constante movimiento.⁴⁸

El mundo material (φυσικός), por ser una copia imperfecta (εἶδωλον) del mundo de las ideas, no existe verdaderamente; es decir, no tiene la existencia propia de las ideas, sino que su ser (τὸ ὄν) le viene prestado de ellas, por cuanto las cosas particulares

⁴⁷ Consúltese Elena (1985, pp. 16 ss.) y Pérez Sedeño (1986, pp. 58 ss.) para una discusión sobre la autoría de esta frase. Duhem (1985, p. 5) atribuye a Platón la pregunta.

⁴⁸ Planeta: etimológicamente, *πλανήτης*: “lo que vaga”, “lo errante”; es decir: “lo que *aparentemente* escapa al control lógico”, “lo que necesita una explicación”.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

de las que el mundo consta son imitaciones (μίμησις) y participan de estas ideas originales.

La teoría muestra la unidad que subyace a la multiplicidad del mundo físico y el orden al que necesariamente se somete todo aquello que participa de las ideas. La ciencia (ἐπιστήμη) indica lo que permanece por encima de los cambios, proporcionando un espacio no sometido al cambio habitual de las cosas que sirva al hombre como guía frente al devenir (γίγνεσθαι), recogiendo en el lenguaje las normas (νόμος) que articulan lo existente; la proposición es el lugar donde se fija la estructura que late en el mundo y que permite el acceso a esta realidad última (ἀρχή).

En el *Timeo*, el Demiurgo crea el mundo a partir de dos elementos: las ideas, que tiene presentes, y la materia caótica e informe (χάος), la cual es ordenada y formada de acuerdo a los patrones fundamentales proporcionados por las ideas. Atendiendo a criterios estrictamente físicos y matemáticos, el Demiurgo construye el mundo a partir de las relaciones estructurales de figuras sólidas como tetraedros, cubos, hexaedros, octaedros e icosaedros, demostrando, además, que su número no puede ser mayor. La fuerza del mito está en que señala la primera “modelización” del mundo a partir de un material y unas pautas para su ordenación, convirtiendo al Demiurgo en el primer teórico de la filosofía occidental cuyo conocimiento no es meramente pasivo, sino que, dotado del poder de transformar a la materia preexistente en algo sólido y real, modeliza un material en bruto para convertirlo en un producto acabado y articulado según unas formas a las que tiene acceso y conoce.⁴⁹

En este sentido, el modelo es un resultado de la *aplicación* de la teoría a un material que necesita ser agrupado, unificado y modelado a partir de unas pautas básicas proporcionadas por los enunciados que forman la teoría y que median en la construcción del modelo. El Demiurgo, protohombre de ciencia, utiliza sus conocimientos geométricos y físicos para modelar una realidad carente de forma y que, por tanto, hasta su actuación sobre ese material, no ha llegado a comprender.

De Platón destacamos, por un lado, su realismo, porque considera que el mundo debe su realidad a una estructura más profunda cuya investigación es el fin de la ciencia,

⁴⁹ Este sentido de la palabra modelo coincide con el expresado en la Sección § 1.4 del Capítulo I. Este proceso es lo fundamental del *Timeo*, y lo que durante los siguientes dos mil años condicionará la historia de la ciencia occidental.

II. EL DEBATE REALISMO *VERSUS* INSTRUMENTALISMO

criterio que influirá poderosamente en científicos como Kepler, y por otro lado, su instrumentalismo, por el énfasis en reducir la realidad física a modelos geométricos y matemáticos a partir de los cuales reconstruir los movimientos aparentes de la naturaleza⁵⁰.

Pero vayamos con la Astronomía. En la *Figura 2.1* está simulado el movimiento de la trayectoria de Marte, con ayuda del programa informático *The Sky* y la colaboración del físico Javier González. En la *Figura 2.2*, se representa la trayectoria del mismo planeta, Marte, desde una posición diferente: hay infinitas combinaciones y lazos, dependiendo de las posiciones relativas de Marte y de la Tierra. Así, las dos figuras corresponden a inclinaciones y perspectivas diferentes. En las figuras están pintadas en rojo las trayectorias de Marte, y en azul claro la línea de la eclíptica. Marte se mueve por la misma zona, pero no exactamente, debido a la inclinación del plano de su órbita. En la imagen están señalados los momentos correspondientes al máximo y mínimo locales que todo buen modelo debería ser capaz de explicar.

Estos movimientos aparentemente erráticos era lo que apreciaban los astrónomos de la Antigüedad y lo que exigía una explicación. Estas gráficas, aunque menos precisas que en la actualidad, eran los datos experimentales **D**, a los cuales había que buscar un modelo **M**, a partir de ciertas hipótesis **H**. Estas hipótesis se las dio Platón:

De estas trakerías con que está bordado el cielo hay que pensar que son, es verdad, lo más bello y perfecto que en su género existe; pero también que, por estar labradas en materia visible, desmerecen en mucho de sus contrapartidas verdaderas, es decir, de los movimientos con que, en relación la una con la otra y según el verdadero número y todas las verdaderas figuras, se mueven, moviendo a su vez lo que hay en ellas, la rapidez en sí y la lentitud en sí; movimientos que son perceptibles para la razón y el pensamiento, pero no para la vista⁵¹.

⁵⁰ Me parece demasiado atrevido atribuir a Platón una mera posición instrumentalista. Platón busca esencias, proporciones, la realidad del mundo física explicada mediante el mundo suprasensible.

⁵¹ Cf. Platón, *La república*, Libro VII, 529d. Traducción de José Manuel Pabón y Manuel Fernández-Galiano. Texto de belleza incomparable que resume la filosofía de la ciencia de Platón.

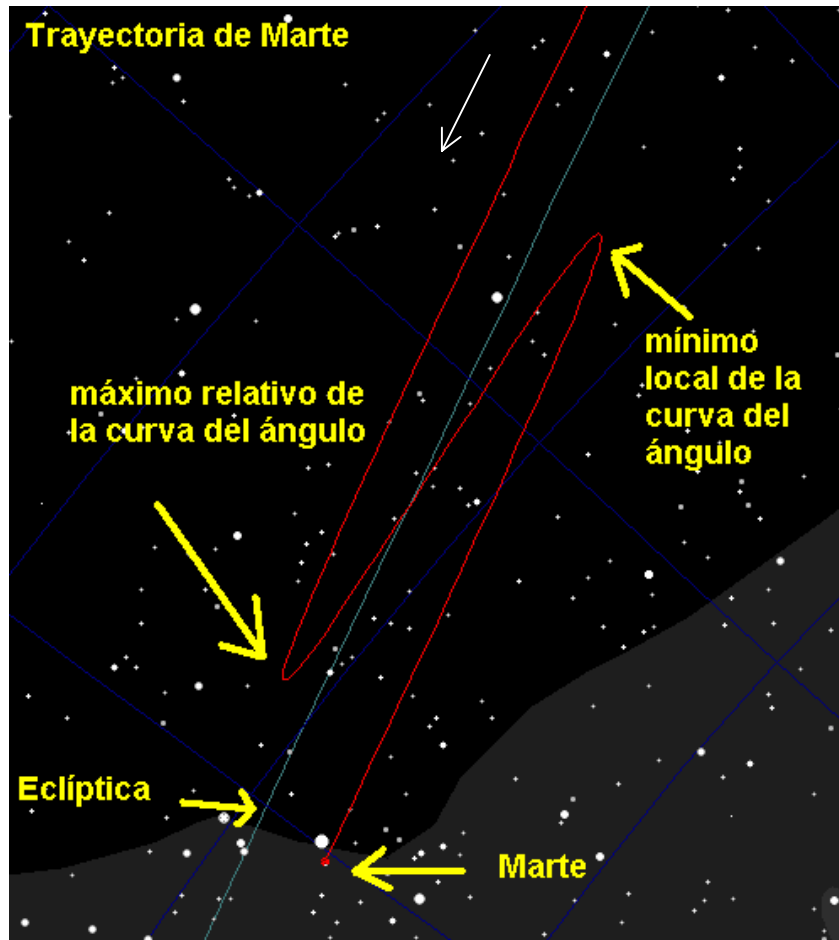


Figura 2.1

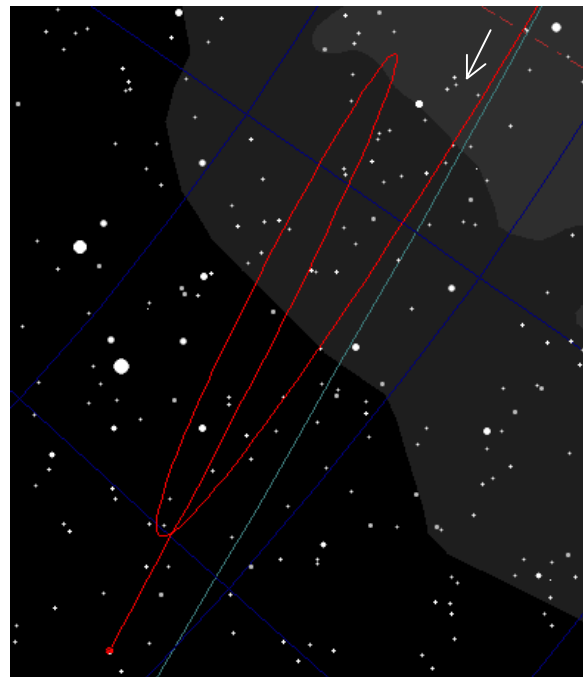


Figura 2.2

II. EL DEBATE REALISMO *VERSUS* INSTRUMENTALISMO

2.2. Justificaciones empíricas y teóricas

Un discípulo de Platón, Eudoxo de Cnido (408-355), retoma el *problema de los planetas de Platón*, y sustituye los círculos por un sistema de esferas homocéntricas ligadas entre sí que giran alrededor de la tierra. Hacia la misma época, los babilonios resolvían complejos movimientos celestes en términos de movimientos periódicos simples. Ya en el año 2000 a. C. habían descubierto que Venus retornaba a la misma posición cinco veces en ocho años, y a partir del 700 a. C. registraron sistemáticamente las observaciones astronómicas, calculando los períodos de las revoluciones de los planetas y prediciendo fenómenos astronómicos como los eclipses lunares⁵². Investigaron la naturaleza celeste a partir de regularidades observables y en el siglo IV a. C., disponían de un método algebraico que descomponía los movimientos complejos en movimientos periódicos sencillos. Calcularon los valores medios de los ciclos celestes y descubrieron que las desviaciones mostraban también un patrón regular.

El sistema de Eudoxo interpreta geoméricamente lo que los babilonios habían desarrollado aritméticamente. Así, convierte cada movimiento periódico simple en una esfera con centro en la tierra. Los astros se encuentran situados en el ecuador de una serie de esferas que giran con movimiento uniforme alrededor del eje que pasa por sus polos⁵³. En el interior de cada esfera, y con el fin de explicar las variaciones de velocidad de los planetas y sus movimientos retrógrados de inversión sobre el fondo de las estrellas fijas, se sitúa una segunda esfera fija a la primera por los polos. Concéntricas a estas dos, una tercera esfera gira de este a oeste alrededor de un eje que forma un ángulo de $23 \frac{1}{2}^\circ$ con el eje común de las dos primeras. La rotación de la esfera exterior -que da una vuelta cada 23 horas y 56 minutos- corresponde al movimiento diurno del Sol de Este a Oeste, mientras que la rotación hacia el este de la esfera interior salva las apariencias de la traslación del Sol a lo largo de la eclíptica.

Para el sistema lunar de Eudoxo bastaba también con tres esferas, mientras que para los planetas tuvo que introducir una cuarta. La combinación de las esferas, donde una arrastraba a la siguiente al mismo tiempo que era arrastrada por la anterior, permitía dar cuenta de los movimientos observados de los planetas, de acuerdo con los datos que se disponían en la época, y exigía una habilidad matemática destacada para combinar los

⁵² Cf. Manson (1996, I, p. 19)

⁵³ Cf. Rivadulla (2003, pp. 22 y ss.) y Kuhn (1978, pp. 89 y ss.)

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

ejes de rotación, los radios de giro y las velocidades para que se ajustaran lo máximo posible a la realidad. En total, su sistema contenía 27 esferas, ninguna de las cuales, excepto la de las estrellas fijas, tenía una existencia real, sino que constituían elementos del aparato geométrico-matemático para salvar las apariencias⁵⁴.

El sistema de Eudoxo no estaba exento de dificultades. Una de ellas, como señala Kuhn (1978, p. 93), era que los planetas cambiaban de brillo en su movimiento de retrogradación, lo que parecía sugerir que su distancia respecto de la Tierra variaba; esto no era permitido por el modelo de Eudoxo, por cuanto las esferas tenían un radio constante y las distancias eran fijas respecto de la Tierra. Además, el Sol no parecía moverse a velocidad uniforme, al menos durante algún tiempo, y las observaciones de la trayectoria de Marte o Venus no terminaban de ajustarse al modelo.

Con el fin salvar mejor las observaciones⁵⁵, Calipo (370-300), según cuenta Aristóteles en su *Metafísica* (1074a), añadió una esfera más para los planetas Mercurio, Venus y Marte, y dos para la Luna y el Sol. Por esta misma época, Heráclides del Ponto (388-312) había ensayado un sistema donde Mercurio y Venus giraban alrededor del Sol, mientras que la Luna, el Sol, Marte, Júpiter y Saturno lo hacían alrededor de la Tierra. Para Heráclides, es la Tierra la que se mueve en una rotación diurna, no la esfera de las estrellas fijas, lo que desde luego suponía un cambio importante en el modelo que hasta Aristarco de Samos, en el siglo III, no volvería a tenerse en cuenta⁵⁶.

El sistema de Aristóteles se proponía dar una explicación física de los movimientos aparentes de los cielos. Todas las esferas del modelo aristotélico eran reales, y, como tales, estaban compuestas de materia, aunque de una materia especial, el éter, sustancia cristalina, incorruptible y ligera, de la que todo el Universo, excepto la Tierra, estaba formado.

A fin de que el movimiento se comunicara realmente entre unas y otras esferas, tal que el primer movimiento correspondiente a la esfera de las estrellas fijas transmitiera a

⁵⁴ El paso de la aritmética a la geometría constituye sin duda un paso decisivo para el realismo científico, porque permite preguntarse por la naturaleza física o imaginaria de los elementos geométricos como las esferas, cosa que no se habían preguntado los babilonios, que disponían de un método computacional desarrollado a partir de tablas.

⁵⁵ Véase la exposición en Rivadulla (2003, p. 24).

⁵⁶ Esto no significa que no se discutiera, sino que existían razones muy fuertes para no cambiar el modelo, de acuerdo con el instrumental de recogida de datos de la época.

II. EL DEBATE REALISMO *VERSUS* INSTRUMENTALISMO

las demás su actividad mecánica por medio del contacto y del rozamiento, Aristóteles introduce 29 esferas más intercaladas en las de Eudoxo, las llamadas *esferas compensadoras*, que giraban en dirección contraria a las anteriores y restablecían la posición de la esfera del astro colocado debajo de ellas.

El modelo matemático implicado en el Universo de Aristóteles (en total, 47 esferas) no varió respecto del de Eudoxo (según presentes las mismas dificultades: los cambios de brillo y las variaciones en las distancias); pero sí modificó el estatuto ontológico de sus elementos, las esferas, que se convirtieron en transmisoras reales del movimiento, en agentes y pacientes físicos sujetos a las leyes universales del movimiento, entre las cuales estaban la imposibilidad del vacío y de que todo movimiento no fuera causado por algo.

La razón por la que Aristóteles introdujo las nuevas esferas no fue porque considerara que el mecanismo de Eudoxo era un artificio meramente matemático⁵⁷, sino porque lo consideraba *incompleto*, una explicación parcial, que no hacía referencia, entre otras cosas, a la materia responsable de ese movimiento.

Para Aristóteles, el modelo físico tiene *necesariamente* una estructura matemática, unas relaciones geométricas y de proporción que los cuerpos guardan entre sí *objetivamente*, en cuanto cosas, por lo que en principio se pueden obtener, para el caso de los planetas, tablas de observación, para luego comparar las posiciones reales con las predicciones de los modelos. La diferencia está, según nos dice en los *Analíticos Posteriores*,⁵⁸ en que los matemáticos abstraen la causa formal de los fenómenos, y la tratan por separado, de modo que pueden establecer nuevas relaciones abstractas entre los objetos; ahora bien, tratándose de la realidad física, la estructura formal ha de complementarse con otras estructuras igualmente importantes, que corresponde a las otras tres causas: materia, finalidad, y agente eficiente.

Aristóteles reprocha a los atomistas⁵⁹ que olviden la finalidad y la causa eficiente de los procesos, y sólo se ocupen de las estructuras materiales y formales del mundo:

⁵⁷ Al fin y al cabo, el modelo de Eudoxo, aunque se le llame matemático, relacionaba las posiciones de ciertos cuerpos, los planetas, con el tiempo, y alguna “relación” tenía que guardar con la realidad.

⁵⁸ Concretamente, Libro I, Cap. 13, 78a - 79b. También en *Física*, 198a15; 198b5. Y en *Metafísica*: 1073a.

⁵⁹ *Física*: 184a22; 188a22; 194a20; 203a21, 33; 213a34; 251b16; 252a34.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

los átomos en movimiento, junto a las leyes del choque. A los pitagóricos⁶⁰ les censura sus modelos estrictamente matemáticos, basados en la armonía de los números, y de los que Platón tomó la idea de que en el mundo existe una proporción numérica que determina la esencia de las cosas⁶¹. Finalmente, Aristóteles considera incompletos también los modelos estrictamente físicos de los jonios⁶², que sólo atendían a la *materia* que permanece en todos los cambios, sin tener en cuenta las consideraciones acerca de la *forma* como se producen esos fenómenos.

En cualquier caso, con la separación entre una astronomía matemática y una astronomía física, llegamos hasta la época alejandrina, donde Aristarco de Samos (310-230 a. C.), además de medir por primera vez las distancias desde la Tierra al Sol y la Luna, así como sus tamaños relativos, propone un modelo heliocéntrico, donde el Sol se coloca inmóvil en el centro del Universo y la Tierra y los planetas giran alrededor describiendo movimientos circulares. Su sistema no fue aceptado porque no se adecuaba a los hechos, es decir, porque no salvaba las apariencias. Entre las dificultades, figuraban los experimentos donde se lanzaban objetos desde barcos y torres, la aparente inmovilidad de las estrellas fijas al trasladarse de unas regiones a otras de la Tierra, o el hecho de que los fenómenos atmosféricos no quedaran rezagados respecto de la Tierra si se la suponía en movimiento.

Conocemos la obra de Hiparco de Rodas (?-125 a. C.) a través del *Almagesto* de Ptolomeo. Las contribuciones de Hiparco pasan, entre otras, por la determinación del ángulo de la eclíptica, el descubrimiento de la precesión de los equinoccios, varios instrumentos para la observación, nuevos cálculos de los tamaños y distancias a la Tierra del Sol y la Luna, un catálogo de 850 estrellas, la medida de irregularidades en la trayectoria de la Luna, y una mayor precisión en el cálculo de la duración del año solar. Hiparco habría perfeccionado el sistema de epiciclos y deferentes de Apolonio (262-190 a. C.), “el Gran Geómetra” de Perge, quien pasa por ser el fundador de la Astronomía matemática cuantitativa y habría determinado los puntos precisos en los que un planeta permanece estacionario e invierte el recorrido de su marcha.

⁶⁰ *Física*: 203a4; 204a33; 213b23; 222b18.

⁶¹ Otros términos fundamentales, como la velocidad uniforme, la perfección del círculo y la correspondencia entre macrocosmos y el microcosmos, son de origen pitagórico también.

⁶² Véase, por ejemplo, *Física*, Libro I, Cap. 4.

II. EL DEBATE REALISMO *VERSUS* INSTRUMENTALISMO

Dado un planeta P, el sistema de Hiparco, como se aprecia en la *Figura 2.3*, se basa en la construcción de dos circunferencias, de centros T y E, y de radios r_1 y r_2 , el deferente y el epiciclo, respectivamente. El planeta P se mueve con velocidad angular uniforme ω_2 alrededor de E, mientras que E gira alrededor de T con velocidad angular uniforme ω_1 . En T está situado el centro de la Tierra. En E se sitúa el Sol, pero sólo para los planetas inferiores, mientras que en los superiores resulta un punto matemático⁶³. En cuanto al movimiento de P, en ocasiones puede ir en dirección contraria al movimiento de E sobre el deferente (es el caso del Sol y la Luna) y en otros a favor.

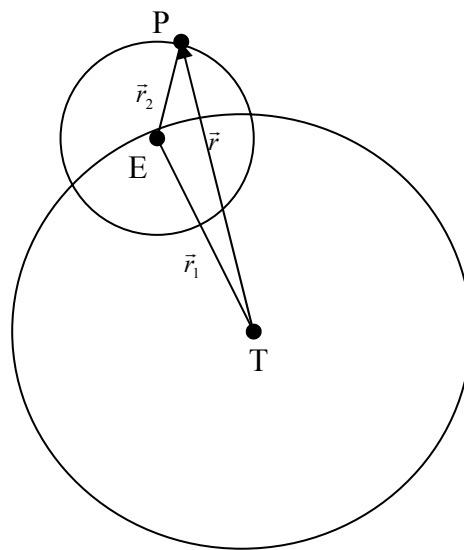


Figura 2.3

En notación vectorial, si llamamos \vec{r} al radio vector que va desde la tierra (T) hasta el planeta (P), \vec{r}_1 al vector que une la Tierra (O) con el centro del epiciclo (E), y \vec{r}_2 al vector que tiene su origen en el centro del epiciclo (E) y finaliza en el planeta (P), tenemos un problema básico de posiciones y velocidades relativos a dos sistemas de referencia cuyo cálculo se simplifica si suponemos (como se suponía) que las velocidades angulares ω_1 y ω_2 con las que se mueven E respecto de T y P respecto de E son constantes.

⁶³ Referencias para este modelo y Figura en Kline (1992, p.216), Lindberg (1992, pp. 100-101), Hall (1985, p.97), Rioja y Ordóñez (2004, p. 65).

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Denominando con \vec{v} la velocidad lineal del planeta respecto de un observador situado en la Tierra, y designando el producto vectorial con el símbolo “ \times ”, las ecuaciones del movimiento, en coordenadas cartesianas, serían:

$$\begin{cases} \vec{r} = \vec{r}_1 + \vec{r}_2 \\ \vec{v} = \vec{\omega}_1 \times \vec{r}_1 + \vec{\omega}_2 \times \vec{r}_2 \end{cases}$$

Las ecuaciones se tornan más complicadas si se quiere afinar más con el modelo y que se ajuste con más precisión a las tablas de observación. Pero el modelo siempre va a tener irregularidades, no es un patrón perfecto de adecuación: trata de ajustarse lo que puede a los datos empíricos, pero no a cualquier precio, sino siempre que las modificaciones y los ajustes del modelo puedan ser controlados, es decir, siempre que no se gane rigor y precisión a costa de perder el dominio matemático de la situación.

En este sentido, como he defendido en Calvo (2004, p.179), la modelización es un doble proceso de ajuste donde ningún plano tiene preferencia sobre el otro: la adecuación es doble, de los hechos a la teoría, de la teoría a los hechos; ahora bien, siempre es preferible perder exactitud experimental a quedarse sin ningún tipo de combinación matemática que permita, hasta cierto grado de precisión, dentro de cierto error, salvar las apariencias.

El modelo de Hiparco permitía resolver las principales dificultades de los modelos anteriores. Ahora el planeta se acercaba y se alejaba respecto de la tierra, y los cambios relativos de su brillo quedaban explicados. Como dice Rivadulla (2003, p. 29):

La composición de estos dos movimientos del planeta da cuenta de sus movimientos hacia el este, y de sus retrogradaciones hacia el oeste, al tiempo que explica las variaciones aparentes de su diámetro y las diferencias de la intensidad de su brillo. Como de esta manera quedaba salvada la mayor dificultad del sistema eudoxiano de esferas homocéntricas, la nueva teoría astronómica, que dejaba intacto los dogmas del geocentrismo y de la inmovilidad de la Tierra, no tuvo dificultades en ocupar su lugar, acallando al mismo tiempo los tímidos destellos del neoheliocentrismo de Aristarco.

II. EL DEBATE REALISMO *VERSUS* INSTRUMENTALISMO

Durante trescientos años el sistema de Hiparco estuvo vigente. El modelo tenía especial éxito con el Sol y con la Luna, no tanto con otros planetas.⁶⁴

Ptolomeo (100-178), como gran matemático que era, podía permitirse el lujo de elaborar una versión mejorada del modelo, porque dominaba las herramientas imprescindibles para realizar un cambio, sin que ello supusiera perder lo que ya se conocía hasta la fecha. No se trataba de conservar sólo los hechos, las tablas de observación, que en este caso llegaban desde tiempos de los egipcios, caldeos y babilonios, sino de conservar el aparato racional que permite explicar esas observaciones. Cuando los instrumentos de medida se van precisando, y nuevos datos y evidencias experimentales se conocen, entonces puede realizarse una modificación de los modelos básicos anteriores sin que ello suponga un “cambio de mundo”. Porque los instrumentos de medida no son entes independientes de la teoría: son el resultado justamente de la teoría que se dispone en ese momento. El avance de la trigonometría, los estudios definitivos de las cónicas realizados por Apolonio, eso fue, entre otras cosas, lo que permitió aplicar nuevos métodos de observación y precisar los antiguos.

Ptolomeo, de entrada, demostró que existían dos sistemas geométricos equivalentes, uno basado en la excéntrica móvil y otro en el sistema de epiciclo y deferente. En el modelo de excéntrica el planeta gira uniformemente alrededor de un punto que ya no correspondía a la Tierra, aunque seguía próximo a ella. A esta circunferencia se la denomina *excéntrica*, y posiblemente fuera ya utilizada por Hiparco. El planeta barría ángulos iguales para tiempos iguales, pero solamente respecto del centro de la excéntrica, C. El modelo explicaba lo mismo que el sistema de epiciclo y deferente; entre otras cosas, por qué desde la Tierra el planeta parecía tener una velocidad no uniforme.

Pero Ptolomeo no se quedó ahí. Con el fin de realizar una descripción geométrica más ajustada de la trayectoria real de los planetas, especialmente para los planetas superiores, hizo girar el epiciclo sobre la excéntrica, en lugar de sobre el deferente. Además, supuso que el planeta se movía con velocidad angular uniforme respecto de un punto que no estaba situado ni en la Tierra ni el centro de la excéntrica, sino sobre un punto imaginario llamado *ecuante*.

En la *Figura 2.4* se aprecia la combinación de elementos para explicar la trayectoria de un planeta⁶⁵.

⁶⁴ El error a la hora de predecir los eclipses de Luna era de una o dos horas, mientras para los eclipses de Sol la precisión era menor. Véase Kline (1992, p. 217).

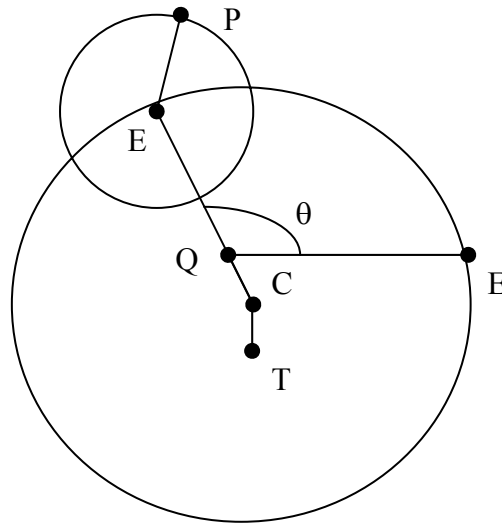


Figura 2.4

El movimiento de los planetas se produce como consecuencia del movimiento diario de la esfera de las estrellas fijas de Este a Oeste. Para explicar su trayectoria irregular, se supone que el planeta se mueve alrededor de E, mientras que E gira alrededor de C, donde ya no está la Tierra (T), y por eso se llama *excéntrica*. Lo importante es que la velocidad angular del punto E resulta constante no respecto a T ó C, sino respecto a Q, de manera que QE barre ángulos iguales en tiempos iguales. El punto Q es llamado *ecuante*, porque el segmento QC es de la misma longitud que CT.

Con Marte, Júpiter y Saturno, los planetas superiores, el centro E del epíclito describe una circunferencia alrededor de la deferente con el período de la órbita de cada planeta alrededor de la eclíptica, mientras el planeta gira sobre su epíclito anualmente, lo que explica sus irregularidades. Para Mercurio y Venus, los planetas inferiores, el epíclito explica el período propio y la circunferencia deferente las irregularidades anuales. Para el Sol no es necesario un epíclito, sino sólo una excéntrica. El modelo para la Luna resulta algo más complicado. En cualquier caso, siempre se podían añadir nuevas circunferencias, excéntricas, epíclitos, deferentes, o ajustar los centros, para tratar de salvar las apariencias. El sistema ganaba en complejidad matemática para ajustarse lo que podía a los resultados de la observación, y explicaba por qué la velocidad de los planetas, vista desde la Tierra, no era uniforme.

⁶⁵ Fuentes utilizadas para la *Figura 2.4*: Lindberg (1992, p. 104), Combrie (1996, p. 84), Kline (1992, p. 218), Hall (1985, p. 105), Rioja y Ordóñez (2004, p. 74).

II. EL DEBATE REALISMO *VERSUS* INSTRUMENTALISMO

En definitiva, el modelo de Ptolomeo y las ampliaciones que sus seguidores hicieron en los siglos posteriores se sometía a la exigencia de Platón: explicar lo que necesitaba una explicación a través de lo que no necesitaba explicarse; en este caso, a partir de movimientos regulares, de la geometría del círculo, de las velocidades uniformes; las apariencias erráticas, de esta manera, volvían al control del *lóγος*, y su comportamiento resultaba racional. La naturaleza, a fin de cuentas, actuaba de forma uniforme y de acuerdo con patrones definidos, aunque no se comprendieran muy bien las causas. Ptolomeo, en el Libro IX del *Almagesto*, dice:

La causa de los primeros principios es o bien nada o bien algo difícil de interpretar en su naturaleza.

Así que, de momento, Ptolomeo se conformaba con encontrar el modelo más simple que describiera las observaciones, sin preocuparse por el fundamento final de los elementos explicativos⁶⁶. De todas formas, parece que en *Las hipótesis de los planetas*, obra escrita con posterioridad al *Almagesto*, sí que pretendió dar una explicación física de los movimientos observados. Allí supuso que detrás de la esfera de las estrellas fijas había otra esfera (la novena, en su sistema) que comunicaba el movimiento diario de Este a Oeste, mientras las demás esferas se movían lentamente en círculos en la dirección opuesta⁶⁷.

Pero, centrándonos en el *Almagesto*, ¿eran realmente hipótesis arbitrarias? Así lo supone Duhem (1991, pp. 39-43), para quien -se utilice el modelo que se utilice- solamente constituye un mecanismo artificial carente de realidad física, una construcción matemática formada a partir de las hipótesis y de los principios más sencillos posibles. La decisión entre qué modelo usar sería una cuestión de conveniencia, dependiendo de los resultados que se obtengan. No sería la verdad, o el descubrimiento de las causas profundas, lo que llevaría a optar por un modelo u otro, sino el éxito o el fracaso que resulta de aplicar el modelo a un sistema particular. La decisión sobre qué enunciados explicativos se aceptan, y cuáles no, viene dada por la naturaleza del fenómeno que se

⁶⁶ *Non fingo hypothesis*, diría Newton quince siglos después, ante la pregunta de qué podría causar las fuerzas.

⁶⁷ Véase la discusión en Pérez Sedeño (1986), donde se considera que Ptolomeo, por las afirmaciones hechas en el Libro I, es un científico realista. Véase también Combric (1996, p. 83).

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

estudia. Para algunos, puede resultar aceptable un modelo que para otros no resulta adecuado. Sería su adecuación, o mejor, su *aceptabilidad empírica*, lo que determina cuál ha de usarse y cuál no.

Sin embargo, no se puede olvidar que todos estos modelos tienen muchas cosas en común. Aunque cada planeta requiera su propio sistema, todos se basan en los mismos principios, los que obedecen a la pregunta de Platón. Ptolomeo, incluso, está muy influido por Aristóteles, y considera imposible el movimiento de la Tierra por las mismas causas que las expuestas por el Estagirita. Las diferentes versiones del modelo tienen una base común, ciertos elementos explicativos relativamente simples: circunferencias, velocidades angulares constantes, radios de giro; otra cosa es que se compliquen en su aplicación a la realidad, pero eso forma parte de la esencia de la modelización.

Simplicio, en sus comentarios a la Física de Aristóteles (Libro 2, capítulo 2), cita la siguiente exposición de Gemino⁶⁸:

A menudo, el astrónomo y el físico se propondrán demostrar el mismo hecho; por ejemplo, que el Sol es de gran tamaño, o que la Tierra es esférica; pero no seguirán el mismo camino. El físico demostrará los hechos por medio de consideraciones sobre la esencia o sustancia, de la fuerza, de lo que conviene mejor a su perfección, de su generación y transformación; el astrónomo, sin embargo, cuando demuestra los hechos a partir de las condiciones externas, no está cualificado para juzgar acerca de la causa, como cuando, por ejemplo, afirma que la Tierra o las estrellas son esféricas. A veces, incluso no desea indagar la causa, como cuando reflexiona sobre las elipses; otras veces, inventa, a modo de hipótesis, y establece ciertos recursos por cuya presuposición se pueden salvar los fenómenos.

Y más adelante añade:

Porque no pertenece a la tarea de un astrónomo conocer qué es por naturaleza apropiado a la posición de reposo y qué tipo de cuerpos son aptos para moverse, sino que introduce hipótesis por las que algunos cuerpos permanecen fijos, mientras que otros se mueven, y entonces considera a qué hipótesis corresponden los movimientos observados efectivamente en el cielo. *Debe, sin embargo, tomar sus primeros principios del físico*, a saber: que los movimientos de los astros son simples, uniformes y ordenados; *y por medio de estos principios demostrará* entonces que el movimiento rítmico de todos los astros es circular, algunos en círculos paralelos, otros en círculos oblicuos.⁶⁹

⁶⁸ Citado en Combrie (1996, pp.86-87)

⁶⁹ Los subrayados son míos. Quiero hacer notar que incluso estos llamados modelos matemáticos utilizan los principios de la Física, y que nunca han estado desconectados de ella.

II. EL DEBATE REALISMO *VERSUS* INSTRUMENTALISMO

El texto es claramente aristotélico, y corresponde con la distinción entre Física y Matemática, o mejor dicho, entre Física y *Matemática Aplicada*, como puedan ser la Óptica y la Astronomía de aquel tiempo. La Matemática, cuando se aplica, toma sus principios de otra ciencia, y se ajusta al sistema real que trata de representar.

Cuando Duhem contrapone la labor del astrónomo matemático, que sólo buscaría salvar las apariencias, a la del astrónomo físico, de carácter realista, y que trataría de explicar la verdadera naturaleza de las cosas, creo que olvida una cosa: que tanto Eudoxo como Copérnico son astrónomos, primero, y luego matemáticos. Tanto Ptolomeo como Kepler, cuando hacen Astronomía, están haciendo Física, no Matemática, aunque se valgan de los métodos de la Matemática. En el debate entre astrónomos realistas e instrumentalistas las posturas no están tan enfrentadas como parece. Sobre todos ellos rige el mismo principio metodológico: la sistematización de lo real a partir de hipótesis teóricas. *El debate no consiste en escoger entre la Matemática y la Física, sino en el grado de fundamentación teórica de los modelos.* En ningún momento se pone en duda la efectividad *física* de los modelos de Ptolomeo, sino el grado de justificación teórica de los mismos. Tan matemático es un modelo aristotélico como otro ptolemaico. La expresión “modelo matemático”, con el que se pretende diferenciar un modelo meramente empírico de otro más justificado teóricamente, es completamente redundante, y no puede servir para distinguirlos.

También en Kline (1992, p. 213) encontramos la afirmación, refiriéndose a Eudoxo, de que “su teoría es completamente moderna en su espíritu, pues hoy en día la finalidad de la ciencia consiste en dar una descripción matemática de los fenómenos y no una explicación física de los mismos”. La Física de hoy, como la de ayer y la de siempre, es física, no matemática. Eudoxo era un físico, no un matemático, aunque para un físico tan estricto como Aristóteles, por ejemplo, resultaran *incompletos* sus modelos y sus explicaciones, *porque no estaban derivados directamente de T , el conjunto de principios físicos aceptados, sino de un conjunto de hipótesis H apoyadas empíricamente, pero no teóricamente.*

En la época alejandrina, tras el espectacular desarrollo de la geometría sintetizada en el sistema de Euclides, las investigaciones sobre las cónicas de Apolonio y los fundamentos de trigonometría en el propio *Almagesto*, Arquímedes construyó sus modelos de mecánica y de hidrostática *no sólo* a partir de consideraciones geométricas, como se

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

viene repitiendo, sino fundamentalmente a partir de una serie de *modelos que sintetizaban la esencia física de los cuerpos*: ¿cómo puede ser un “centro de gravedad” una cosa matemática?; ¿cómo va a ser el “empuje” y la “reacción” que un cuerpo experimenta al sumergirse en un fluido antes matemáticos o geométricos? No: eran modelos físicos, la realidad *no* se idealizaba, si con ello se entiende que se apartaba del mundo físico hacia la Geometría; por el contrario, *se sintetizaba*: a falta de principios teóricos fuertes, se recogía la información disponible en un modelo: ésta es la diferencia básica, lo que posteriormente va a influir decisivamente en Galileo y en todo el Renacimiento.

Las palancas abstractas, sin peso, permitían, como posteriormente el modelo pendular y de caída libre de los cuerpos, establecer una taxonomía de los casos, a partir de la cual estudiar el comportamiento de los cuerpos reales. Pero ello no significa que despojaron la realidad de sus componentes físicos, sino que se tomó lo esencial de ellos abstrayendo sus propiedades cuantitativas más importantes, y construyendo un *modelo básico como principio explicativo de la realidad observable*. En ningún momento el modelo pasó de ser físico para convertirse en algo matemático. El aparato matemático se está refiriendo a algo real, físico: tiene una referencia en el mundo; no está construido en el vacío. En otras palabras, el sistema, desde el punto de vista semántico, *está interpretado*, aunque no se ajuste por completo a esa realidad a la que trata de representar. Esto es lo esencial de estos modelos, su *referencia física*, no su carácter puramente matemático.

Además, ¿de qué otra forma va la ciencia a referirse a la realidad si no es de modo matemático, si no es de forma cuantitativa? ¿Cómo iban los científicos de la Antigüedad, los del Renacimiento, o los contemporáneos, a ponerse de acuerdo, a lograr un lenguaje intersubjetivo, si no es haciendo referencia a cantidades, a números, a expresiones que ligan las magnitudes con los conceptos? Lo matemático es una cuestión de adecuación formal, imprescindible para hacer ciencia. Las proporciones, las leyes, ya sean de carácter probabilístico o determinista, se expresan de manera matemática, se relacionan magnitudes, conceptos, variables, ya sean físicas, biológicas o económicas. Los fenómenos, en este sentido, sólo los conocemos expresados en forma matemática: basta con observar la realidad, con construir tablas, con registrar los valores, con encontrar una fórmula, con contrastarla, con ver hasta dónde se ajusta, con mejorar las observaciones con instrumentos más precisos, con modificar las tablas, o la fórmula; en definitiva, con

II. EL DEBATE REALISMO *VERSUS* INSTRUMENTALISMO

un proceso de control del mundo y de la naturaleza sobre bases puramente racionales, empíricas, y lógicas.

2.3. Un ejemplo de modelo astronómico

En toda la Edad Media domina el sistema ptolemaico, aunque se tratara de encontrar una explicación física satisfactoria, de acuerdo con los principios aristotélicos, que fundamentara el movimiento aparente de los cielos⁷⁰. En París, por ejemplo, a finales del siglo XIII, se propuso materializar las esferas externas tal que en su interior circularan los planetas con sus epiciclos, mientras que, por el contrario, Pedro de Abano sugirió la posibilidad de que las estrellas no necesitaran ningún tipo de esfera sólida, y que se movieran libremente en el espacio.

Respecto al debate entre astronomía física y matemática, las posiciones fundamentales se mantienen en torno a tres puntos:

1) Sobre la verdad de las hipótesis implicadas en estos modelos, hay autores, como Santo Tomás de Aquino, que niegan su carácter de leyes, ya que la explicación de los movimientos aparentes podría concebirse mediante otros procedimientos “no atisbados aún por los hombres”⁷¹. Las hipótesis pueden precisarse, hacerse más complejas, y no tiene por qué existir un único análisis de la realidad. Se distingue entre la verdad transitoria, instrumental, y la verdad necesaria, las *verae causae*. La pregunta es: nuestro conocimiento sobre los fenómenos astronómicos, ¿tiene un carácter decididamente hipotético, o puede alcanzarse algún día la verdad?

2) Si las hipótesis tienen como fin salvar los fenómenos, pero son herramientas más o menos limitadas, cuya verdad no está decidida por el hecho de que pueden ser sustituidas por otras hipótesis que logren los mismos objetivos, entonces, ante dos o más sistemas equivalentes, el matemático escoge la herramienta más sencilla, la que le supo-

⁷⁰ Es decir, un modelo basado en principios físicos fundamentales tendría que ser capaz de computar las apariencias por lo menos con la misma eficiencia con que lo hacía un modelo meramente empírico.

⁷¹ Santo Tomás, en su *Comentario al De coelo* de Aristóteles, citado en Rivadulla (2004, p.23). También en *Summa theologiae*, parte I, cuestión 32, artículo I, citado en Combric (1996, p.87).

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

ne un menor gasto teórico y una mayor economía en la representación. Ya hemos visto cómo Ptolomeo había demostrado la equivalencia entre un sistema de epiciclos y deferentes, y otro de excéntricas. Ante un número de hipótesis equivalentes, que salvan por igual los fenómenos, el criterio para la decisión sobre cuál modelo se usa, es la sencillez⁷².

Sin embargo, debemos diferenciar entre representaciones alternativas. Buena parte de los modelos de Ptolomeo no son incompatibles entre sí, sino que más que bien se refieren a un mismo fenómeno, sólo que representado de distinta forma. Aquí, la elección entre la representación “más sencilla” no parece tener mucho sentido, a no ser que se indique expresamente que se refiere a la relativa sencillez de escoger unos ejes de referencia respecto de otros, para obtener unas ecuaciones más sencillas. Pero los modelos, más que compatibles, son perfectamente equivalentes entre sí, en el sentido de que producen el mismo resultado. Cabría diferenciar, por consiguiente, entre representaciones alternativas equivalentes, y representaciones alternativas incompatibles. En este último caso, habría que acudir a los principios que construyen el modelo para ver el nivel donde radica la incompatibilidad.

3) Sobre la existencia real o ficticia de los círculos que describen los modelos, autores como Giovanni Pontano aseguran que “no existen”, y que por eso “no son visibles”. Son intentos por comprender, fruto de nuestra imaginación...⁷³ Sin embargo, no parece ser tal fácil “inventar” un modelo. Durante mil trescientos años estuvo vigente el modelo de Ptolomeo, al cual se añadió únicamente versiones que lo mejoraban. Históricamente, a pesar de la facilidad con que se mencionan “estos inventos”, no hay muchas personas que sean capaces de imaginar un modelo alternativo. Sin duda, no es lo mismo hablar sobre la ciencia que hacer ciencia; no es lo mismo hablar sobre la naturaleza de los modelos que construir uno. El modelo no sólo debe ser consistente, también tiene otra misión: *representar*.

Además, los modelos *no se inventan, se construyen*. Es decir, que hay que partir de una serie de principios que estén más o menos justificados. A partir de estos principios, entonces, y sólo entonces, el sistema se va adaptando a la realidad. ¿Cómo se consiguen estos enunciados que posteriormente se utilizarán, no sólo para predecir, sino

⁷² Éste es el criterio de Gil de Roma (1247-1316), según Combrie (1996, p. 87).

⁷³ La cita es de Duhem (1985, p. 55).

II. EL DEBATE REALISMO *VERSUS* INSTRUMENTALISMO

también para explicar, o al menos, para hacer algo más comprensible el fenómeno? Es decir: ¿cómo se logran estos *principios demostrativos*?

Capuano, en su comentario de 1945 a *Theorice nove planetarum Georgii Purbachii*⁷⁴, nos ofrece su versión, frente a quienes, como Girolamo Fracastoro (1478 - 1553), rechazan la astronomía ptolemaica:

Los principios de la Astronomía se infieren a posteriori y de los sentidos; habiendo notado y observado el movimiento y demás accidentes de un planeta, uno concluye demostrativamente [...] que éste tiene una excéntrica o bien un epiciclo. El principio de esta demostración es el movimiento observado [...]. Pero además uno encuentra⁷⁵ ciertos tipos de estricta demostración matemática, pues, una vez postuladas las esferas y sus movimientos, los objetos observables pueden ser inferidos demostrativamente.

Detengámonos un momento en estas aseveraciones. Aquí se dice que “los principios de la Astronomía se infieren a posteriori”. Y después se pueden establecer conclusiones demostrativas, se puede inferir matemáticamente, con las leyes del álgebra. Lo difícil es lograr estos principios, de carácter empírico, según Capuano. Después se introduce la necesidad en el sistema, en la demostración deductiva. Pero, si los principios han de obtenerse de la experiencia, de forma inductiva, para después, utilizando esos principios generales, deducir, adelantarse al comportamiento real, predecir, o explicar, si están ya registrados los movimientos, la justificación de esos primeros principios vendrá dada por la experiencia: no vale cualquier cosa.

Para la construcción de estos modelos astronómicos se necesita, como para la construcción de cualquier otro modelo que trate de representar un fenómeno físico, un *lenguaje de observación neutral*⁷⁶. Estos son datos de la observación, a partir de instru-

⁷⁴ Citado en Duhem (1985, p. 53).

⁷⁵ Se está refiriendo al *Almagesto*.

⁷⁶ Con ello no quiero indicar, por supuesto, que los enunciados de observación estén libres de carga teórica. En este caso, se supone que existe un observatorio privilegiado, la Tierra, que está inmóvil en el centro del Universo. El adjetivo “neutral”, aplicado a un lenguaje de observación, quiere indicar simplemente que los enunciados de observación aceptados en una determinada época tienen que ser *válidos* para todos los científicos, como condición previa para que se propongan las diferentes teorías y modelos que han de dar cuenta de esos hechos. Por ejemplo, aunque teóricamente se suponga que la Tierra es el centro del Universo, las medidas de las sucesivas posiciones de un planeta quedarán registradas haciendo referencia a la posición que el observador ocupa respecto del fenómeno que mide. Es decir, que la medida

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

mentos de medida cuyo aparato teórico se sitúa *por debajo* de la teoría que se pretende demostrar, descubrir, o confirmar. Las tablas de observación, en el caso de estos modelos astronómicos que estamos estudiando, son *enunciados aceptados* de observación, datos empíricos, números que designan conceptos empíricos básicos, como la posición o el tiempo. Estos enunciados de observación llegaban, en algunos casos, desde tiempo de los egipcios, de los caldeos, de los babilónicos. Estas tablas de observación eran la cosa a explicar, *lo que requería un modelo*. Para conseguir elaborar estas tablas es necesario elegir los conceptos empíricos relevantes, las magnitudes físicas que se han de tener en consideración. Para Eudoxo, Hiparco, Apolonio o Ptolomeo estos conceptos empíricos se referían a la posición de un planeta y al tiempo que tardaba en recorrer determinados puntos de su trayectoria. Con la posición y el tiempo, tenemos dos variables significativas que hay que poner en correspondencia, una con otra, para ver de qué modo dependen entre sí, y cuál es la relación que existe entre ellas.

Una vez que se ha escogido cuáles son estas magnitudes relevantes, se las pone en correspondencia con unos símbolos que desde este momento tienen como única referencia la realidad física, y continúan refiriéndose a ella en todos los procesos del cálculo posterior. Es decir, que los conceptos *nacen interpretados* desde un primer momento, que no se interpretan después, que designan una magnitud física relevante, una dimensión física, y que esa dimensión se refiere en último término a una sensación, sensación que se puede experimentar por cualquiera.

Previamente, hemos escogido unos ejes y unas coordenadas adecuadas al fenómeno que se va a estudiar. Ya que Eudoxo, Apolonio, Hiparco y Ptolomeo creían que la Tierra se situaba en el centro del Universo, allí situaron el centro de coordenadas, como posición privilegiada desde la cual el observador realiza una serie de medidas. Cada uno de los ejes nos indica cuáles son los valores máximo y mínimo donde esa magnitud física va a tener sentido, es decir, los valores dentro de los cuales ha de ofrecerse una medida de esa dimensión. Las sucesivas posiciones que un planeta como Marte va toman-

hace referencia siempre a la posición relativa del observador con aquello que va a medir. Indicar que el observador se sitúa en la Tierra no prejuzga de ningún modo las medidas, ni las invalida cuando surja una teoría revolucionaria como la de Copérnico. De hecho, Copérnico se basa en las Tablas Astronómicas anteriores para rechazar el modelo geocéntrico, y lo mismo hace Kepler con relación a las Tablas que le legó Brahe. Cambiar el sistema de referencia, colocar al Sol en el centro del Universo, no significa que cambie el mundo, o que las medidas anteriores hayan perdido su carácter objetivo y neutral.

II. EL DEBATE REALISMO *VERSUS* INSTRUMENTALISMO

do en el espacio pueden ser recogidas entonces en una tabla numérica que exprese el valor de la coordenada x y de la coordenada y , o, si se opta por otro tipo de coordenadas, como las polares, cilíndricas o esféricas (cosa que tiene mucho sentido si la trayectoria de los planetas se consideran circulares), el valor de los radios y el de los ángulos respecto de los ejes.

Con unos aparatos de medida adecuados, que por supuesto envuelven teoría (¿cómo iba a ser de otra manera?) el observador registra, para cada valor de una variable escogida por él (la posición, su radio vector, por ejemplo), el valor de las demás variables que se supone van a depender de la primera (el tiempo que tarda el planeta en alcanzar una posición determinada, por ejemplo). Así, elabora una tabla cuya mayor o menor exactitud (cuyo mayor o menor grado de adecuación a la medida real) depende de la precisión del aparato con el que se toman esas medidas.

El error que se comete en una medida depende, primero, de las propias unidades con las que el aparato de medición mide, de manera que existen unos umbrales máximo y mínimo a partir de los cuales la máquina, a través de sus sensores, deja de sentir cosa alguna, y, segundo, de las variaciones con que el aparato de medida mide la misma cantidad, que nos da una medida de la fiabilidad del instrumento, de la incertidumbre que, estadísticamente, lleva asociada.

En todo caso, cuando Hiparco decide volver a medir las posiciones de los planetas para elaborar unas nuevas tablas, porque ha dejado de fiarse de las tablas que la tradición le ha legado, está expresando una confianza en sus métodos de medida actuales, que implican nuevas teorías trigonométricas, por ejemplo, y una manera de medir donde se disminuye el error que siempre lleva asociado cualquier medida. Pero Hiparco no creía que las tablas que se usaban en Babilonia, por ejemplo, fueran falsas; sino que no eran lo suficientemente precisas para su estado actual de conocimiento.

Los instrumentos de medida son el fruto de la teoría de la que se dispone en ese momento, y nunca son cosas que se elaboren al margen de los principios teóricos que sustentan la ciencia de la época. Un astrolabio, un cuadrante mural, una lente, implican trigonometría, principios de reflexión y refracción, perspectiva... Ahora bien, no por eso los instrumentos van a dejar de ser objetivos: ellos miden lo que pueden y lo que se les deja que midan, según cómo se les haya diseñado, según lo que puedan sentir dependiendo de los detalles que pueda captar los sensores que llevan incorporados. *Su "carga teórica" no llega nunca a situarse por encima del modelo que han de confirmar o re-*

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

chazar en el contexto de justificación empírica. Se sitúan por debajo, no alcanzan las leyes que han de descubrirse o demostrarse, no implican los resultados de observación, no prejuzgan el resultado experimental, no pueden hacerlo: son simples dispositivos, máquinas señalizadoras.

Veámoslo con los ejemplos astronómicos. Sea **D** una tabla que relaciona la posición y el tiempo que toma un planeta para un observador situado en la Tierra. **D** es lo suficientemente fiable para **C**, el científico. **C** incluso, puede haber sido el mismo que haya elaborado las tablas, como pueda ser el caso de Ptolomeo, Hiparco, o Copérnico. En el caso de Kepler, digamos que **D** le vino ampliamente suministrado por Tycho Brahe. Las tablas suponen una cuadrícula espacio-temporal donde se sitúan los fenómenos, y dan una relación de posiciones en función del tiempo. **C** se propone modelizar el fenómeno, y se hace la siguiente pregunta: “¿Qué fórmula matemática me permite ligar las dos variables en cuestión?” O: “¿Qué función F me permite hallar v_2 en función de v_1 ?”, donde v_1 es la variable independiente y v_2 la variable dependiente, el resultado que arroja la función.

Ahora bien, esa función F no puede ser de cualquier manera. Tiene que someterse a ciertas condiciones matemáticas consecuencia del sistema físico que tratan de representar. F tiene que ser computable geoméricamente, de manera que la representación pueda ser manejada matemáticamente. El modelo va a tratar de simular el comportamiento del fenómeno: va a proporcionar una trayectoria ideal que trate de ajustarse lo máximo posible a lo que en realidad hace el planeta. El modelo tiene que dar información *a priori* sobre el comportamiento de ese planeta, tiene que ser capaz de predecir lo que va a hacer. Se trata de computar el movimiento a partir de una serie de datos, de buscar esa función computable cuyos valores se acerquen a los resultados observacionales, y que en conjunto constituyan una representación más o menos aceptable de lo que está ocurriendo en la realidad.

En otras palabras: el modelo es una *reconstrucción* de la realidad a partir de hipótesis básicas. La reconstrucción permite salvar las apariencias, permite explicar por qué salen así los datos. El paso fundamental para lograr esa reconstrucción es hallar una función que sea capaz de reproducir las tablas obtenidas con antelación, las tablas empíricas que hasta el momento constituyen los enunciados aceptados de observación.

Volvamos ahora a la trayectoria de Marte, *Figura 2.1*. Sea α el ángulo con el que un observador mide la posición de un planeta antes, durante y después de su movimien-

II. EL DEBATE REALISMO *VERSUS* INSTRUMENTALISMO

to de retrogradación sobre el fondo de las estrellas fijas. Existe una *Tabla* que da una relación de α en función del tiempo t . Esta tabla, de acuerdo con mi idea del proceso de modelización, es **D**, el *explanandum*, lo que requiere una explicación. La pregunta es: ¿qué función $\alpha(t)$ me permite computar α en función de t ? Es decir, si parto de t como variable independiente, ¿cómo puedo obtener *más o menos* los resultados de α que están en las tablas?

Pero esta función no puede ser de cualquier manera. F tiene que reproducir el movimiento observable del planeta, en todos los puntos de su trayectoria. F , matemáticamente, tiene que ser una función continua, tal que todos los puntos de la trayectoria tengan un límite por la izquierda y otro por la derecha, y que los dos límites coincidan. Es decir, que si $F: I \rightarrow \mathbb{R}$, es una función real y definida en un intervalo no degenerado I (en nuestro ejemplo, los valores donde está definido t), F es continua en $a \in I$, si y solamente si

$$(\forall \varepsilon > 0) (\exists \delta > 0) (\forall x \in I, |x - a| < \delta) \wedge (|F(x) - F(a)| < \varepsilon)$$

O lo que es lo mismo, cuando

$$\lim_{x \rightarrow a} F(x) = F(a)$$

F será continua si y sólo si es continua en todo punto a de I .

La continuidad de F es una condición para la representación del movimiento. De otra manera, el planeta, en su trayectoria, podría ir a saltos, de manera que de repente apareciera en un sitio y en el instante después lo hiciera sin solución de continuidad en otro lugar. Como eso no ocurre en la naturaleza (o al menos eso suponían los astrónomos), la continuidad de la función que ha de representar el movimiento es una *condición física* impuesta a F , sólo que expresada en forma matemática.

Pero no sólo eso: la función F , la función que va a modelizar el fenómeno, que va a encontrar una fórmula matemática para derivar α a partir de t , tiene que ser *diferenciable*, tiene que tener una tangente asociada en cada punto de la trayectoria. La razón, de nuevo, vuelve a ser *física*: el planeta tiene que tener una velocidad en cada punto de su trayectoria, una velocidad instantánea; siempre tiene que existir la derivada de la posi-

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

ción, del ángulo, respecto del tiempo. El principio físico teórico que guía esta condición es el siguiente: “En la naturaleza, todo lo que se mueve tiene una velocidad”, es decir: “En todo punto de la trayectoria de un móvil su velocidad tiene que estar definida”, lo que quiere indicar, simplemente, que exista en todo punto la derivada de la posición respecto del tiempo: $F, \alpha(t)$, tiene que ser diferenciable.

En términos matemáticos, una función F definida en un entorno de a es derivable en a si su cociente incremental tiene límite finito en a , y en ese caso su derivada en el punto a es:

$$F'(x) = \lim_{x \rightarrow a} \frac{F(x) - F(a)}{x - a}$$

Por supuesto, la función que Ptolomeo e Hiparco encontraron, en el modelo más sencillo de epiciclo y deferente, *Figura 2.5*, es diferenciable y, por lo tanto, continua.

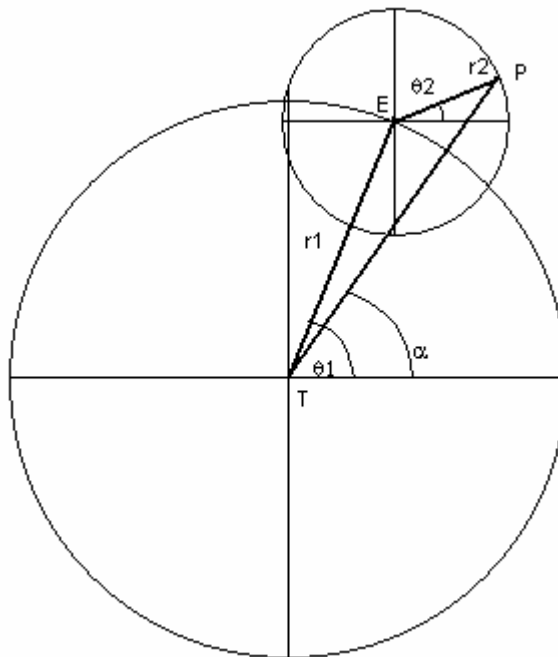


Figura 2.5

II. EL DEBATE REALISMO *VERSUS* INSTRUMENTALISMO

El ángulo α que forma el eje horizontal con la línea que une la Tierra (donde está el observador) y el planeta, viene dado en función del tiempo (variable independiente), de la distancia de la Tierra al centro del epiciclo, de la distancia del centro del epiciclo al planeta, y de las velocidades angulares con las que giran el planeta respecto de E, y E respecto de la tierra.

Descomponiendo las componentes de los vectores en función de los ángulos y de los radios, se puede demostrar fácilmente que:

$$\tan \alpha = \frac{r_1 \operatorname{sen} \theta_1 + r_2 \operatorname{sen} \theta_2}{r_1 \cos \theta_1 + r_2 \cos \theta_2}$$

En efecto, sustituyendo el valor de los ángulos por la velocidad angular multiplicada por el tiempo, y dado que podemos dividir el numerador y el denominador de la segunda parte de la ecuación por r_2 , nos queda:

$$\alpha = \arctan \left(\frac{\frac{r_1}{r_2} \operatorname{sen} \omega_1 t + \operatorname{sen} \omega_2 t}{\frac{r_1}{r_2} \cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t} \right)$$

La relación $\frac{r_1}{r_2}$ indica la proporción de radios que guardan entre sí las circunferencias del epiciclo y deferente, y constituye un dato del problema. ω_1 y ω_2 son velocidades angulares constantes que corresponden al planeta respecto del centro del epiciclo y del centro del epiciclo respecto de la Tierra, y pueden, en principio, ser calculadas empíricamente con un error experimental del que puede darse un rango de incertidumbre.

Ahora bien, ¿cómo se calculan estos datos básicos de observación, la relación entre radios y las velocidades angulares? Hay diversos procedimientos, y todos ellos implican trigonometría y medidas de observación, que los astrónomos anteriores a Copérnico sin duda conocían⁷⁷. En primer lugar, podemos calcular el período de E respecto de la Tierra, lo cual no es muy difícil realizando medidas astronómicas relativas a dos es-

⁷⁷ Véase Hall (1985, pp. 98 y ss.) donde se refiere la importancia de estos datos básicos (las proporciones entre radios, y los períodos del epiciclo y del planeta) para Copérnico.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

trellas fijas, por ejemplo, midiendo el ángulo que forman con E y esperando que las estrellas vuelvan a la misma posición. Para el período de Marte respecto de E, el problema es el calcular los períodos relativos de dos cuerpos que se mueven respecto de un tercero (período sinódico): se toma una posición inicial entre los tres cuerpos (cuando están en línea recta, por ejemplo) y se espera el tiempo suficiente para que vuelvan a ocupar esa posición; hay una relación entre los tres períodos que puede calcularse a partir de una fórmula. En tercer lugar, para la relación entre radios, podemos partir de las velocidades angulares ω_1 y ω_2 y esperar a que Marte, la Tierra y el centro del epiciclo, por ese orden, formen un ángulo recto, para calcular el coseno del ángulo que forman Marte, el centro del epiciclo, y la Tierra, y que nos da directamente la proporción entre radios.

En cualquier caso, lo importante es que estos datos aceptados de observación implicaban avances teóricos y matemáticos, lo que sugiere que hay una relación estrecha entre el progreso teórico y empírico. Consideremos entonces los siguientes datos de observación:

Período de la Tierra: $365,25 \pm 1$ días.

Período de Marte: 687 ± 5 días.

Relación entre los radios de las dos órbitas: $R = 1,523 \pm 0,015$ (un 1%)

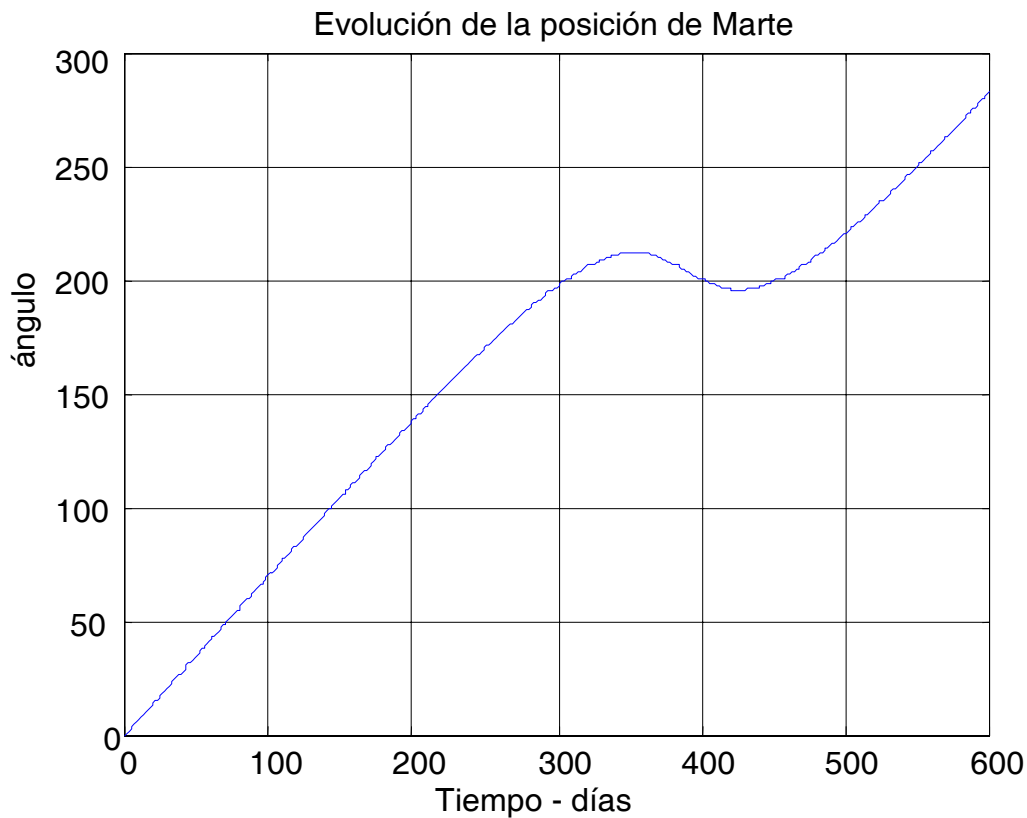
En la actualidad, la incertidumbre es mucho menor, pero obviamente los astrónomos antiguos no tenían la precisión de nuestras medidas. Así que la incertidumbre está escogida más o menos arbitrariamente, con el fin de simular hasta qué punto estos modelos eran capaces de predecir⁷⁸.

Sabiendo estas cantidades podemos obtener los valores de α , el ángulo que mide el desplazamiento del planeta sobre la eclíptica, para una serie de tiempos t_1, t_2, \dots, t_n . La gráfica de la función $\alpha(t)$, elaborada con el programa *MatLab*, sería la siguiente⁷⁹:

⁷⁸ Sin embargo, los datos se acercan mucho a las posibilidades técnicas de la época, y de hecho, se ajustan mucho a los datos reales que los astrónomos poseían.

⁷⁹ Reitero mi agradecimiento a J. González, con cuya colaboración he elaborado la gráfica y la tabla de predicción.

II. EL DEBATE REALISMO *VERSUS* INSTRUMENTALISMO



En la gráfica se aprecia que α crece hasta un máximo local entre los días 300 y 400, donde el planeta empieza su movimiento de retrogradación, hasta que llega al mínimo local entre 400 y 500 días y vuelve a crecer, terminando el rizo y continuando su movimiento a lo largo de la elíptica. Hemos obtenido una “*simulación*” del movimiento del planeta, un *modelo* de su comportamiento.

Ahora podemos predecir qué va a hacer el planeta un determinado día del año, y cuándo va a comenzar su movimiento “errante”. La siguiente tabla indica los valores para cuatro puntos de la gráfica, el máximo, el mínimo, y otros dos, uno delante y uno detrás del rizo:

Tiempo - días	Ángulo (°)
200	138.11 ± 0.02
354	212.31 ± 0.08
426	196.40 ± 0.07
600	282.63 ± 0.60

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Los valores α_i que arroja la función pueden ser comparados con los datos de observación reales, \mathbf{D} , la tabla original, de manera que tras su cotejo podamos indicar cuál es el grado de aproximación que el modelo muestra respecto a la realidad. El error que se cometería, designando por las letras α_{0i} los valores de α medidos directamente, y expresados en \mathbf{D} , sería $|\alpha_i - \alpha_{0i}|$, menor que cierta tolerancia δ :

$$|\alpha_i - \alpha_{0i}| < \delta$$

Ahora podemos decir que hemos calculado α_{0i} con una precisión δ .

Partiendo de un problema, de unos datos iniciales, y de una serie de hipótesis, hemos logrado un modelo que describe más o menos el fenómeno, y que es capaz de predecir su comportamiento. Esta es la esencia de la modelización.

Llegados a este punto, quisiera hacer dos observaciones:

1) El método que aquí se ha supuesto parte de los hechos hasta encontrar el modelo. Por supuesto, esto no significa que para encontrar la función matemática que genera los datos de observación, haya que utilizar los métodos inductivos de Stuart Mill⁸⁰; entre otras cosas, porque el modelo siempre se apoya sobre una serie de hipótesis, \mathbf{H} , que constituyen la segunda de las referencias para su construcción. \mathbf{H} son los principios teóricos que sustentan la explicación, y constituye el *segundo grupo de enunciados aceptados*, además de los datos de observación. Las hipótesis pueden provenir de una teoría sistemáticamente elaborada, o bien puede ser una serie de principios aislados, que en principio no tenga nada que ver con una teoría de más alto nivel.

2) Se me puede reprochar el hecho de hablar en términos de funciones, derivadas y límites infinitesimales en una época donde no existía el Cálculo Infinitesimal, ni siquiera la Geometría Analítica de Descartes. Pues bien: los astrónomos griegos, los árabes, los medievales, Copérnico y Kepler, imponían *mediante la Geometría* las condiciones

⁸⁰ Ningún método inductivo (ni el acuerdo, ni la diferencia, ni las variaciones concomitantes, ni los residuos) va a proporcionar, a partir de los datos de observación, una función matemática como la que he descrito *supra*. Para ello hace falta talento matemático, mucho más que disciplina inductiva.

II. EL DEBATE REALISMO *VERSUS* INSTRUMENTALISMO

físicas y matemáticas que he descrito, porque permitía tratar con magnitudes continuas y figuras que cumplieran las condiciones de diferenciabilidad y continuidad, aunque el Álgebra no estuviera tan desarrollada. Una elipse, lo mismo que una circunferencia, cumple estas condiciones, que vienen impuestas por la naturaleza del movimiento que se trata de reproducir, a partir de consideraciones físicas, a partir de limitaciones teóricas. Cuando los griegos descubrieron los números irracionales, demostrando su existencia, se inclinaron hacia la geometría para tratar con figuras que pudieran computar geoméricamente. Las demostraciones geométricas pueden sustituirse por demostraciones algebraicas, todas las figuras tienen una correspondencia en la Geometría Analítica, y ese fue el gran descubrimiento de Descartes, a partir del cual se desarrolla posteriormente el Cálculo Infinitesimal de Newton y Leibniz, pero eso no significa que los astrónomos de la Antigüedad no conocieran las condiciones que tenía que cumplir una trayectoria que simulara la trayectoria real de los planetas. ¡Lo había dicho Platón: si una trayectoria no puede computarse, divídela en trayectorias que puedas computar! Conociendo la geometría del círculo, es posible realizar una simulación del movimiento errático a partir de círculos, a partir de figuras computables, a partir de cosas que la razón puede manejar, de manera que luego podamos anticiparnos al comportamiento y poder predecir lo que va a ocurrir. ¡Predicción, descripción, en este sentido, son cosas que van unidas, y no puede darse una sin la otra!⁸¹

2.4. Sistemas alternativos de representación

Durante buena parte de la Edad Media, los árabes fueron los únicos que conocían a la perfección el *Almagesto*. Desde el siglo IX, realizaban predicciones y cálculos precisos, aunque no fueron capaces de modificar los modelos ptolemaicos hasta el siglo XIII. Ibn-Qurra calculó nuevamente la precesión de los equinoccios y como causa adujo un mecanismo de “trepidación” que se manifestó en las nuevas *Tablas Toledanas*, del siglo

⁸¹ Existen numerosos artilugios mecánicos, muchos de ellos descubiertos por arqueólogos en las ruinas de ciudades antiguas, que permitían conocer la posición de un planeta según la época del año. Estos ingeniosos artefactos constituyen *modelos mecánicos* de precisión, modelos que demuestran la claridad con la que los astrónomos sabían lo que estaban haciendo: *computar*. (Véase en Combrie, 1996, Lámina 2, un modelo mecánico medieval de esferas sólidas para el planeta Saturno.)

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

XI, y en las *Tablas Alfonsíes*, del XIII. Muchos astrónomos preferían la exactitud técnica de los modelos matemáticos frente a la explicación física de los movimientos. En el observatorio de Samarcanda de Ulug Beg, se utilizaban los modelos de Ptolomeo e instrumentos muy precisos para construir tablas que no llegaron a conocerse en la cristiandad hasta el siglo XVII. Otros, como Avempace o Aventofail, preferían el sistema de esferas homocéntricas y sacrificaban la superioridad de cómputo a favor de los principios de la Física de entonces, que seguía siendo la de Aristóteles.

En el siglo XIII, los astrónomos del observatorio de Maraga descubrieron un teorema que hacía equivalente el movimiento rectilíneo a dos movimientos circulares. La misma realidad física podía entonces considerarse de formas matemáticas diferentes, pero *equivalentes* desde un punto de vista físico. Los árabes comenzaron a construir modelos no ptolemaicos donde los movimientos de los planetas se describían mediante círculos con velocidad angular uniforme, alcanzando una primera síntesis entre Física y Matemática.

En Occidente, no se conocía aún el *Almagesto*, pero se disponía de un manual de Sacrobosco donde se estudiaba lo básico de los modelos de Ptolomeo. Sin embargo, en la ciencia de los pesos, se tendió a unificar el *more* geométrico de Arquímedes con los principios físicos. La síntesis llegó en el siglo XIII con Jordano Nemorari, que en los *Elementa Jordani super demonstrationem ponderum*, a partir de nueve supuestos tomados de las leyes aristotélicas, era capaz de derivar geoméricamente como teoremas la ley de la palanca y el postulado de Arquímedes. Las nociones de las que se partía aludían a términos físicos como el peso, la vertical, el equilibrio, las trayectorias de descenso, etc., con lo que se lograba conectar los modelos físico-geométricos con los principios teóricos **T** de la ciencia de la época, convirtiéndose en modelos físicos *per se*.

Este episodio sugiere que los llamados modelos matemáticos, o geométricos, o *simplemente empíricos*, como prefiero yo llamarlos, pues en ningún caso dejan de referirse a la Física, aumentan de rango y se les considera modelos estrictamente físicos cuando dejan de depender de las hipótesis **H** y pasan a depender de **T**, los principios teóricos básicos que sustentan la ciencia en un momento de la historia. Mejor aún, cuando las hipótesis **H** son deducidas a partir de **T**, entonces podemos decir que el modelo ha pasado a formar parte realmente del *corpus* de conocimiento. Hasta entonces, los modelos explican hechos, salvan las apariencias, pero los modelos también necesitan ser explicados. Sus hipótesis, las que han logrado el éxito, aguardan a la espera de que

II. EL DEBATE REALISMO *VERSUS* INSTRUMENTALISMO

una mente científica superior consiga derivarlas de principios teóricos, de leyes más básicas que rigen para el resto de los modelos conocidos y usados. Éste es, en esencia, el problema de los modelos meramente empíricos (o modelos de datos), y en el que insistiré varias veces en esta tesis doctoral.

A mediados del siglo XV, Regiomanto y Walther elaboraron estudios trigonométricos, tablas de seno y corrigieron los instrumentos de observación hasta lograr una precisión de 5' para los planetas y de 1' para el Sol; además, había correcciones que tenían en cuenta la refracción de la atmósfera. Con estos nuevos cálculos, Copérnico ensayó nuevos modelos no ptolemaicos que no se sujetaran a los principios de la ciencia de Aristóteles. Copérnico lograba una síntesis general de todos los modelos conocidos hasta la fecha. Explicaba lo que ellos, y más, pero tenía en contra los mismos argumentos que ya se plantearan a Aristarco, entre ellos la ausencia de paralaje estelar: ¿por qué entonces no se movían las estrellas sobre el fondo de las estrellas fijas cuando se medía su posición en diferentes estaciones del año?

Sin embargo, los mejores astrónomos de la época usaban el sistema de Copérnico porque salvaba mucho mejor las apariencias, y era relativamente más simple que los anteriores. Tycho Brahe no necesitó mover la Tierra de sitio, y propuso un modelo predictivamente equivalente al de Copérnico. En 1572 observó una supernova, y advirtió que estaba fuera del sistema solar; en 1577 observó un cometa, y lo consideró un cuerpo que orbitaba alrededor del Sol. Las esferas cristalinas no podían existir, porque la trayectoria de estos cuerpos mantenía puntos en común con la de los planetas. Brahe corrigió las *Tablas Prusianas* de Reinhold desde su observatorio en la isla de Hveen, donde disponía de aparatos como sextantes, cuadrantes y globos de gran tamaño. Mediante una observación sistemática, corrigió la duración del año con un error menor que un segundo. Su modelo sustituyó al de Copérnico, y dejaba la Tierra inmóvil alrededor de la cual giraban el Sol y la Luna. Alrededor del Sol, los demás planetas.

Galileo, entonces, terminó por contradecir las hipótesis **H** en las que se basaba el modelo de Ptolomeo. Observó con su telescopio nuevas estrellas, que parecían situarse mucho más lejos de lo que hasta entonces se suponía. La ausencia de paralaje se debía, sencillamente, a que el Universo era de tales dimensiones que hacía imposible que se distinguiera el paralaje estelar. Las piedras que caían desde lo alto de una torre caían al lado de la base porque la Tierra comunicaba un movimiento horizontal al cuerpo, de modo que su composición era parabólica. Además, la Tierra arrastraba la atmósfera en

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

su movimiento, y ningún fenómeno tenía por qué quedarse rezagado respecto de la Tierra. Galileo descubrió manchas en la Luna, en el Sol (cuyos movimientos sugerían que era un combustible en rotación), y las fases de Venus, cuando en el modelo de Ptolomeo no estaba permitido un brillo mayor que los cuartos. Todas estas anomalías, convertidas ahora en *contraejemplos*, dirigidos a los principios que sustentaban el modelo, hicieron decir a Galileo⁸²:

Copérnico se dispuso [...] a investigar cuál podría ser en realidad el sistema del mundo, no ya pensando en la pura comodidad del astrónomo, cuyos cálculos habrían sido satisfechos, sino para llegar a dilucidar tan importante problema de la filosofía natural, en el convencimiento de que si se habían podido salvar las simples apariencias con hipótesis falsas, mucho mejor podría hacerse de la mano de la auténtica constitución del Universo. [...] Así, pues, no propuso esta hipótesis para satisfacer las exigencias del astrónomo puro, sino más bien para plegarse a la necesidad de la naturaleza.

Para Galileo, Copérnico no habla *ex hypothesi*, para salvar las apariencias. Los principios teóricos son verdaderos, así son, tal y como están descritos: “la Tierra se mueve”, es una proposición verdadera, y se corresponde, por tanto, con los hechos. No es una suposición para construir modelos, o derivar cálculos. No se da por buena su verdad, *es verdad*. Instrumentalmente, si consideramos a **T** el conjunto de enunciados verdaderos para un estado de cosas del conocimiento, Galileo propone que las hipótesis **H** en las que se basa el modelo de Copérnico adquieran el rango de **T**, y se utilicen como principios para la construcción de otros modelos en otros campos de la Física, por ejemplo, para la Geografía. *Cuando un principio básico del conjunto H pasa a formar parte de T, ese principio deja de ser una suposición para dar cuenta de un determinado fenómeno y se constituye en garantía para los futuros modelos formados a partir de T.* De esta manera, el principio se generaliza, gana en dominios, crece en amplitud...

El cardenal Bellarmino aconsejó entonces a Galileo⁸³

contentarse con hablar *ex suppositione* y no absolutamente, como siempre he creído que ha hablado Copérnico. Porque decir que suponiendo que la Tierra se mueva y el Sol esté quieto, se salvan todas las apariencias mejor que con poner las excéntricas y epiciclos está muy bien dicho y no hay peligro ninguno, y esto basta al matemático; pero querer afirmar que realmente el Sol está en el centro del mundo y

⁸² Citado en Rivadulla (2004, p. 26).

⁸³ Cf. Pla (1952, p. 109).

II. EL DEBATE REALISMO *VERSUS* INSTRUMENTALISMO

sólo gira alrededor de sí mismo, sin moverse de oriente a occidente, y que la Tierra está en el tercer cielo y gira con suma velocidad alrededor del Sol, es cosa muy peligrosa, no sólo por irritar a todos los filósofos y teólogos escolásticos, sino por dañar la Santa Fe, haciendo falsas las Sagradas Escrituras.

Más allá de la advertencia de Bellarmino a Galileo (Bruno había ardidado en 1600), retengamos lo fundamental: hay un conjunto de verdades en **T** que pueden ser sustituidas afirmando la verdad de **H**. Si **H** se limita a salvar las apariencias, se le considera un conjunto de instrumentos para explicar más o menos unos datos experimentales. Si **H** se hace verdadera, y entra en contradicción con un subconjunto de **T**, **H** puede entrar en **T** y modificar los principios formativos de la ciencia empírica de la época, de manera que los modelos posteriores se construyan atendiendo a **H**, que ya estaría establecido en **T**.

Para Kepler, los principios de Galileo eran “auténticos principios”, es decir, eran verdaderos. Esto es lo que siempre ha diferenciado a una ley de una hipótesis. Las hipótesis, en **H**, pueden ser más o menos razonables, más o menos justificadas. Pero se supone que una ley es una ley, y que es verdadera, formando parte de **T**. Ahora bien, no todos los principios con los que elaboró Copérnico su modelo eran verdaderos: las órbitas no son circulares, sino elípticas, en uno de cuyos focos se encuentra el sol. Es la primera ley de Kepler. La segunda dice que “las áreas barridas por el radio vector que va del Sol al planeta en tiempos iguales, son iguales”. Y la tercera ley sobre el movimiento de los planetas añade que “los cuadrados de los periodos de revolución de los planetas alrededor del Sol son proporcionales a los cubos de los semiejes mayores de sus respectivas órbitas”.

Tal vez Kepler utilizara estas tres leyes como hipótesis primeramente. Con ello construyó su modelo, con ello obtuvo fórmulas empíricas que relacionaban las magnitudes físicas, con ello pudo comparar los resultados de sus modelos provisionales con las tablas que le legó Brahe, y con las observaciones que él elaborara. Cuando descubrió que todo cuadraba, y que el margen de error era muy pequeño en comparación con el de otros modelos (con el de Brahe o con el de Copérnico, no digamos con el de Ptolomeo), entonces apostó por la verdad de **H** y por su inclusión en **T** como leyes. Parece que fueron aceptadas muy rápidamente por los científicos de la época. Parte de **T** se derrumbó y sus pilares cambiaron. Con la inclusión de los principios de Kepler en los enunciados aceptados y *verdaderos* se incluía también un subconjunto de enunciados con los que Copérnico había elaborado su modelo. Señalaré esto como otra forma de progreso cien-

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

tífico: *La inclusión de cierto H en T implica la inclusión de otros H' que se derivan de H .*

Para terminar este capítulo he elaborado un diagrama de flujo (*Figura 2.6*) que a mi juicio sintetiza lo básico de la modelización que hasta ahora he presentado. En primer lugar, en lo que denomino “fase preoperativa”, se caracteriza al fenómeno mediante lo que se considera que son sus propiedades relevantes. Después, tras una serie de medidas, se consigue una serie de enunciados de observación aceptados D . A partir de ellos se busca una función que relacione las variables en cuestión, y que permita predecir los valores de una de ellas, la variable dependiente. El modelo funciona como una máquina que arroja valores *output* dependiendo de la entrada (*input*): es un *proceso definido*, lo que quiere destacarse mediante las rayas laterales de la caja. Las salidas del sistema son predicciones P , enunciados donde a una variable se le asigna un número seguido de unas unidades. P se contrasta con D , puesto que tienen la misma forma. *La única comparación entre el modelo y el mundo se realiza aquí, y en ningún otro sitio.* Se halla el error E , medida de la tolerancia del sistema, y entonces C , el científico, decide si modifica el modelo a través de alguna de sus hipótesis H , o si lo conserva. Por supuesto, las apariencias se salvan mejor o peor, *no* de una vez. La correspondencia exacta con la realidad no tiene sentido: *la verdad es una cuestión de precisión.*

II. EL DEBATE REALISMO *VERSUS* INSTRUMENTALISMO

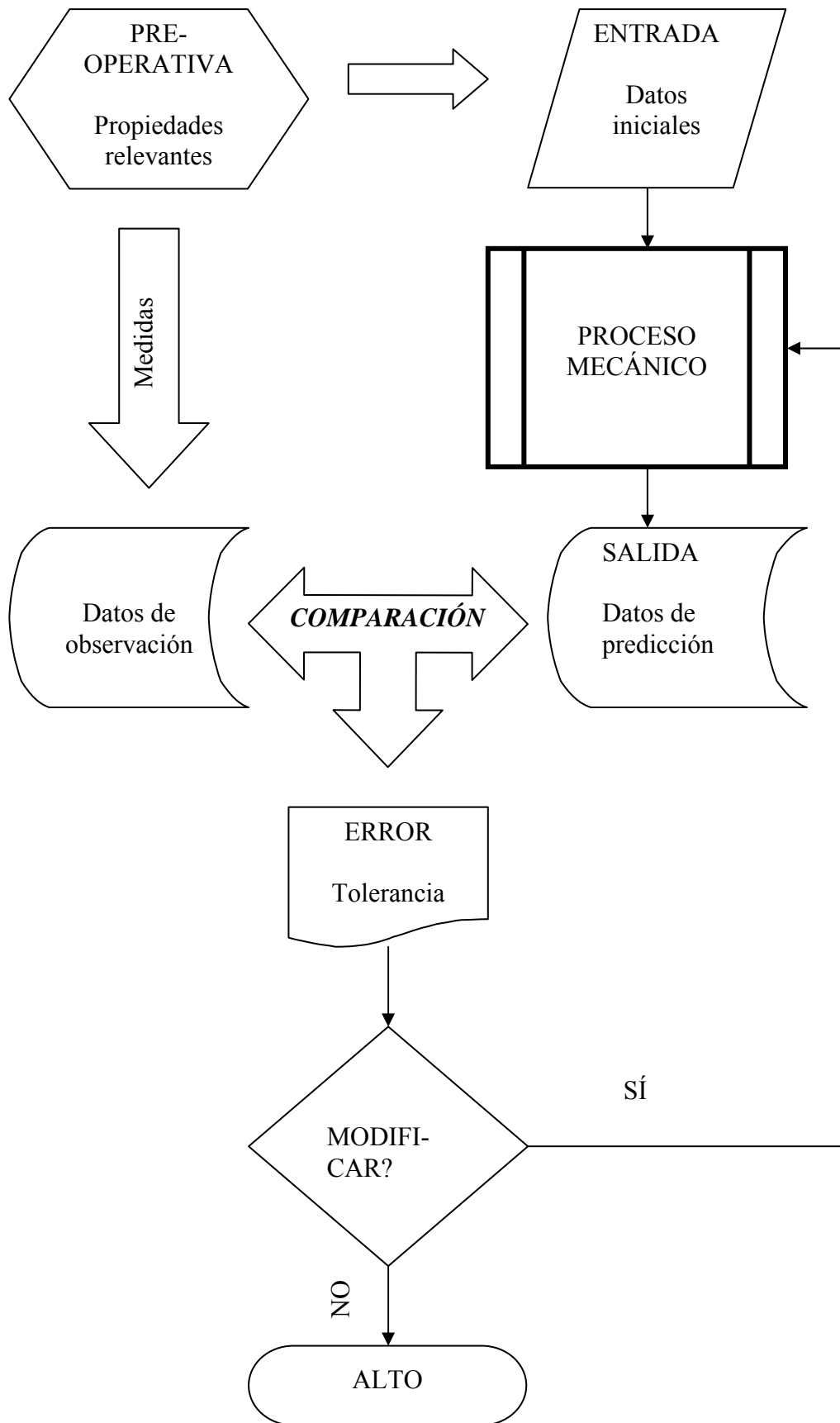


Figura 2.6

2.5. Recapitulación

“Salvar las apariencias” nunca fue una tarea sencilla. Una vez que se han seleccionado los datos de observación y ciertos enunciados teóricos, se requiere un *dominio matemático* que no proporciona ningún método inductivo. Eudoxo, Ptolomeo, Copérnico, Kepler... todos eran grandes matemáticos, a los que no les hubiera gustado que les acusaran de salvar “meramente” las apariencias, aunque sólo fuera por la tremenda *dificultad* de construir modelos tan complejos y equilibrados, que permiten *generar* los datos de observación al tiempo que *predicen* nuevas posiciones y garantizan el control lógico del fenómeno. Los modelos astronómicos son una serie de *ecuaciones* que vinculan cantidades físicas, como la posición, el tiempo, la velocidad, etc. Se refieren a la realidad física, y en ningún momento se desatienden de ella. *Reducen* un fenómeno a sus características físicas fundamentales, y *reconstruyen* su realidad por medio de un *algoritmo* que permita computar su comportamiento. A partir de una serie de ecuaciones, que *describen* (idealmente) la realidad, son capaces de pronunciarse sobre ella. Las predicciones se ajustan más o menos, y hay modelos más adecuados que otros.

El modelo es un *principio explicativo* de la realidad observable; un *explanans* que explica un *explanandum*. Los datos de observación son más o menos *fiabiles*, de acuerdo a los instrumentos de medida, pero siempre dependiendo de los avances teóricos y matemáticos que permitan precisamente mejorar su nivel resolutivo. Ninguna teoría predispone sus resultados en la observación; la observación, simplemente, es una medida, y la “carga teórica” se sitúa por debajo de las predicciones que se quieren probar. La comparación es entre enunciados de predicción y enunciados de observación, y es el *único* momento en el que cotejamos nuestros modelos con la realidad. De esta comparativa surge siempre un error, de forma natural, como una estadística del acierto y del desacierto.

Por otra parte, he reducido el debate realismo-instrumentalismo a una *mayor o menor justificación* del modelo en relación con una serie de principios físicos fundamentales que una determinada comunidad científica considera verdaderos. El modelo, si está justificado empíricamente, es decir, si salva las apariencias, queda a la espera de que alguien sea capaz de deducirlo a partir de estos principios abstractos o leyes fundamentales que constituyen los pilares de la ciencia de una época. La arbitrariedad de los principios que sustentan el modelo, en cualquier caso, está *limitada* por una serie de

II. EL DEBATE REALISMO *VERSUS* INSTRUMENTALISMO

presuposiciones físicas sobre la naturaleza del fenómeno en cuestión, que se convierten en la serie de hipótesis de bajo nivel que de momento sostienen el modelo. En casos muy especiales, las hipótesis que contradicen el conjunto de leyes teóricas más abstractas pueden llegar a utilizarse como principios formativos de otros modelos en campos relativamente diferentes a aquellos para los que han sido creados. Esta “ascensión” no es más que un ensanchamiento del alcance inicial, y no tiene por qué constituir ninguna pérdida de realidad empírica.

También he distinguido entre *sistemas alternativos equivalentes* y *sistemas alternativos incompatibles*. Más aún, he mostrado cómo los primeros se refieren esencialmente al mismo fenómeno, al que representan de manera diferente, con el fin de obtener alguna ventaja en el cálculo y simplificar las ecuaciones, sin que por ello pierdan información física sobre el fenómeno. La elección entre sistemas, en este caso, no significa una mayor o menor preferencia sobre el orden “real” de la naturaleza, ni constituye una decisión ontológica sobre el mundo, sino que más bien se trata de distintas maneras de *esquematizar una misma realidad*, sobre la que se opera desde otro punto de vista equivalente.

El capítulo siguiente, “Modelos de Mecánica Clásica”, muestra la diferencia que existe entre construir un modelo a partir de hipótesis más o menos plausibles, y hacerlo mediante principios firmes que se consideran verdaderos, a partir de deducciones de leyes más abstractas y generales. En este caso, al modelo se le supone “completo”, en el sentido de que hace algo más que salvar las apariencias y está justificado no sólo empíricamente, sino también desde el punto de vista teórico.

De cualquier manera, la pregunta de Platón sigue vigente, y puede generalizarse de este modo: si quieres convertirte en un científico, considera que la realidad es reducible a un esquema racional de comportamiento. “Racional” quiere decir: “predecible, computable”, como si todo lo “errante” tuviera una explicación, y su comportamiento fuera analizable en función de elementos mínimos que *no* son errantes.

CAPÍTULO III

MODELOS DE MECÁNICA CLÁSICA

3.0. Introducción

En este capítulo se estudiarán los modelos de la Mecánica Clásica, como ejemplo de teoría que proporciona una serie de *reglas metodológicas* precisas para la representación sistemática de la realidad.

Así, la Sección 3.1: “Un ejemplo de modelo newtoniano”, aplica las leyes fundamentales de Newton a un fenómeno particular, como es un proyectil que se lanza con una velocidad inicial, y del que se desea conocer su posición en todo momento. La teoría actúa como una serie de reglas básicas para realizar la representación, aunque no soluciona todos los problemas. En primer lugar, hay una *caracterización inicial*, que reduce el fenómeno a un sistema de vectores. Hay también *dos clases de enunciados*: por un lado, las ecuaciones generales de Newton; por otro, los datos experimentales aceptados. A continuación, se realizan una serie de *suposiciones justificadas*, que constituyen aproximaciones más o menos aceptables dependiendo de la precisión y del error aceptable para un científico. Las ecuaciones que se obtienen describen idealmente el fenómeno, lo “simulan”, aunque yo prefiero hablar de una *síntesis*, que permitirá predecir y comprobar nuevas posiciones. Como veremos, hay toda una serie de modelos que pueden deducirse a partir de las ecuaciones principales dependiendo del orden de magnitud donde nos movamos y del grado de aproximación tolerado. En todo caso, siempre es preferible calcular, predecir, a no hacerlo, por tener en cuenta demasiados aspectos de la realidad.

Defiendo que una teoría es una serie de “rutinas” y “subrutinas” ya resueltas y calculadas con anterioridad, de las que un científico puede hacer uso cuando lo crea conveniente. Esta serie no es más que un conjunto de modelos, teoremas y demostraciones,

que la ciencia, hasta el momento, considera verdaderas y que permiten reducir los problemas a modelos ya resueltos. Desde un punto de vista lógico, lo que se persigue es hacer pasar la función de verdad (=1) desde los primeros principios hasta alcanzar todas las ramificaciones.

3.1. Un ejemplo de modelo newtoniano

Los siglos XVII y XVIII conocieron el sistema de *reglas metodológicas* más preciso, eficaz y verosímil para la construcción de modelos que ninguna otra época anterior haya sido capaz de conocer. Los tres axiomas de Newton, o mejor dicho, los tres principios físicos que ninguna hipótesis debía contradecir (ley de inercia, ley de la fuerza, ley de acción y reacción) constituían los pilares del conjunto de enunciados **T** considerados verdaderos a partir de los cuales se elaboraron sistemas de modelización para la casi totalidad de fenómenos registrados. Tal vez no se haya conocido otro momento de la historia donde los científicos creyeran más en la existencia de leyes de la naturaleza, necesarias y verdaderas, que demostraban su eficacia una y otra vez en los muchísimos ejemplos donde tenían ocasión de afirmarse. A partir de **T**, y dada una serie de condiciones iniciales donde se aplicaba la teoría según el fenómeno en cuestión, se elaboraron representaciones sistemáticas para el movimiento de proyectiles, misiles, mareas, sistemas planetarios, osciladores, péndulos, átomos, moléculas, etc.

Si en el Capítulo II he presentado ejemplos de modelos contruidos principalmente para salvar las apariencias de un conjunto de datos de observación, aunque siempre teniendo en cuenta algunos principios físicos que no se quiere contradecir y que se utilizan como fundamento para la construcción, en esta ocasión mostraré cómo se construye un modelo deductivamente, tomando directamente de **T** las leyes teóricas y condicionando el modelo a una serie de circunstancias concretas, dependiendo de la naturaleza del fenómeno que se estudia. **T** en este caso resulta ser una serie de instrucciones precisas y firmes para construir el modelo, unas reglas básicas a las que el científico que quiere modelizar el fenómeno tiene que atender, si no quiere contradecir los enunciados básicos de la ciencia de su época. Por supuesto, late siempre la convicción de que el fenómeno es reducible a un esquema de comportamiento que sintetiza su esencia física.

III. MODELOS DE MECÁNICA CLÁSICA

El modelo es una reconstrucción teórica de la naturaleza del fenómeno, la serie de ecuaciones que la Física entiende como su fundamento⁸⁴.

El modelo es entonces la suma de las ecuaciones teóricas más la serie de condiciones iniciales⁸⁵. Por supuesto, la cosa no acaba aquí: resolver un sistema de ecuaciones puede no ser una tarea fácil, y muchas veces se acude a simplificaciones adicionales que permiten ganar en exactitud matemática a costa de perder cierto rigor, que se encarga de recoger el error experimental. Este error se va acumulando a través de las sucesivas transformaciones del modelo base, pero resulta calculable en todo momento, de manera que siempre se dispone de unos márgenes precisos para las aproximaciones.

Además, y lo más importante, son aproximaciones que tienen una *razón de ser*. Despreciar una cantidad en favor de otra es una cuestión práctica, de órdenes de magnitud, y por ello siempre resulta un proceso referido a la realidad; quiero decir, que mate-

⁸⁴ Aun a riesgo de parecer un esencialista, quiero destacar que las ecuaciones que se obtienen después de aplicar **T** a las condiciones particulares que caracterizan el fenómeno, eso es lo que la Física considera su esencia, aunque sea de manera provisional y tenga mucho o poco que ver con la *ousía* aristotélica. Esa esencia física, que resulta una esencia puramente descriptiva, representativa, explicativa hasta cierto punto, es lo que posteriormente nos va a permitir predecir, anticiparnos al fenómeno en las condiciones finales escogidas por nosotros; para ello, no tenemos más que despejar la variable que se desea hallar y sustituir las variables primitivas por sus valores iniciales.

⁸⁵ Tal vez necesite hacer una aclaración acerca de la necesidad de que los modelos incluyan condiciones iniciales. Por un lado (caso 1), tenemos una serie de condiciones que nos permiten delimitar y simplificar las ecuaciones generales teóricas, como cuando consideramos que la temperatura permanece constante, que la Tierra es una esfera de radio 6370 km, o cuando conocemos el valor exacto de una variable en algún estado del sistema (por ejemplo, en el Capítulo I, cuando sabíamos que el cráneo del que queríamos saber la antigüedad contenía una tercera parte del Carbono C¹⁴ que se encuentra en el cráneo de un hombre en la actualidad). Las condiciones iniciales, en este caso, simplifican el grado de complejidad del sistema de ecuaciones y reducen el número de incógnitas, para poder realizar algún tipo de predicción. Por otro lado (caso 2), en los modelos astronómicos del capítulo anterior, las condiciones iniciales son los valores de la variable independiente (el tiempo, en nuestro ejemplo) presentes en la Tabla Astronómica, que indican *cuándo* el observador realizó las medidas de la variable dependiente. La razón de que estos datos sean las condiciones iniciales es porque permiten deducir (predecir), junto con la fórmula matemática, la serie de valores de la variable dependiente (el ángulo), que serán comparados con la medida real que se registró en la Tabla Astronómica. En todo caso, es importante destacar que las condiciones iniciales hacen referencia a *condiciones conocidas*, y no tienen por qué referirse exclusivamente al estado inicial (en $t = 0$) del sistema. Un modelo es un *explanans*, por lo que todo aquello que se utilice o suponga para deducir lo que quiere ser explicado forma parte del modelo.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

máticamente puede no estar justificado, y unos principios no tienen por qué implicar lógicamente otros, a menos que se supongan dichas simplificaciones.

Una teoría, entonces, y como he señalado en el Capítulo I, § 1.3, no puede ser un sistema axiomático, como si de una serie de axiomas un ordenador pudiera derivar todo el conjunto de verdades que constituyen las tesis del sistema. En efecto, una teoría física es potencialmente enorme, sus teoremas son prácticamente ilimitados, pero necesitan aplicarse a la realidad, necesitan el concurso de las aproximaciones: no se obtienen directamente unos enunciados a partir de otros sin hacer suposiciones sobre la realidad de las cosas. No basta con dar unas reglas de derivación a los axiomas, como si fuera la lógica de primer orden, y deducir de allí sintácticamente todos los teoremas relevantes: no hay tales reglas, hay supuestos de muy diferente naturaleza, supuestos que tienen que ver con la naturaleza real de las cosas, con su esencia física.

Pero todo esto se ve mucho más claramente con la ayuda de un ejemplo. En lo que sigue, desarrollaré un caso típico cuyo tratamiento puede encontrarse en los libros de Mecánica Clásica, como por ejemplo, en Alonso y Finn (1986, pp. 129-136), o en Aguinaga (1990, VI-28-VI-36). Imaginemos a un científico C que quiere conocer la aceleración de un proyectil que se lanza al espacio con una velocidad inicial \vec{v}_0 , en función de la aceleración de la gravedad en las proximidades de la Tierra, incluyendo los efectos de su rotación, g_m , la velocidad angular de la Tierra ω y la latitud con la que sale el proyectil, λ . Para ello realiza las siguientes *suposiciones*:

S.1) La fuerza que otros planetas ejercen sobre el proyectil es despreciable frente a la fuerza debida a la Tierra.

S.2) La Tierra es una esfera de densidad constante, y se la puede considerar como una partícula de masa M situada en el centro.

S.3) Aunque la Tierra tiene un movimiento de traslación en el espacio, se supone que únicamente tiene movimiento de rotación alrededor de su eje Norte-Sur.

S.4) La velocidad angular $\vec{\omega}$ con la que la Tierra gira alrededor es constante en módulo, dirección y sentido.

III. MODELOS DE MECÁNICA CLÁSICA

C dispone de los siguientes datos experimentales, que constituyen los enunciados de observación aceptados, medidos por una serie de procedimientos fiables para **C**, y con un error expresado con un número y un signo \pm delante.

O.1.) Valor de la aceleración de la gravedad en las proximidades de la Tierra:

$$g = 9,8346 \text{ m/sg}^2.$$

O.2.) Valor del radio de la tierra. $R_t = 6370 \text{ Km}$.

O.3.) Valor de la masa de la Tierra. $M = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$.

O.4.) Valor del módulo de la velocidad angular. $\omega = 7,29 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$.

A continuación, *caracteriza* el fenómeno escogiendo un sistema de referencia donde se sitúan vectorialmente las magnitudes físicas relevantes:

C.1) Sea \vec{r} el vector de posición, con origen en el centro de la Tierra, del centro de masa del cuerpo rígido lanzado al espacio.

C.2) Sea \vec{a} la aceleración *absoluta* (es decir, respecto a un observador fijo en el espacio) del centro de masa del cuerpo rígido lanzado al espacio.

C.3) Sea \vec{a}' la aceleración *relativa* (respecto a un observador solidario a la Tierra) del centro de masa del cuerpo rígido lanzado al espacio.

C.4) Sea \vec{v}' la velocidad *relativa* (respecto a un observador solidario a la Tierra) del centro de masa del cuerpo rígido lanzado al espacio.

Como vemos, esta caracterización del fenómeno persigue *reducir* la realidad a un sistema de vectores. Por lo general, estos vectores serán ligados, libres o deslizantes, de acuerdo con la naturaleza de las magnitudes que se representan.

Ahora, **C** se fija en el conjunto de enunciados de **T**, los enunciados aceptados teóricos. De ellos escoge los siguientes:

T.1) Ecuación de la aceleración para dos sistemas de referencia, uno fijo y otro móvil.

T.2) Segunda ley de Newton.

T.3.) Ley de gravitación universal aplicada a dos cuerpos.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Estos tres enunciados aceptados son parte del lenguaje de la Física, y tienen una forma matemática, que relaciona unas cantidades con otras mediante operaciones definidas en el álgebra. **C** escribe las tres leyes de **T**, independientes entre sí, y pone un número entre paréntesis que permita identificar las premisas. Primeramente, la ecuación de la aceleración:

$$(1) \quad \vec{a}' = \vec{a} - \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) - 2\vec{\omega} \times \vec{v}'$$

¿De dónde ha salido esta ecuación? Del estudio cinemático del movimiento; allí se ha supuesto una situación de movimientos relativo y absoluto y ha sido demostrada deductivamente a partir de la definición de las magnitudes físicas. El científico **C** no necesita volver atrás para demostrar la verdad de esta ecuación. Otros ya lo han hecho por él. La fuerza de la argumentación es deductiva. Ahora bien, si quisiera empezar desde el principio, él mismo podría hacerlo. Pero es una *rutina terminada*, una demostración cuya conclusión puede tomar **C** siempre que quiera. Los teoremas más importantes de **T** están ahí para su utilización, ya han sido demostrados: constituyen una subrutina dentro de una rutina más amplia como es la que nos ocupa. (1) puede utilizarse para muchísimos más casos. Nosotros, como **C**, simplemente hacemos uso de ella y la escribimos: es nuestra primera premisa teórica.

$$(2) \quad \vec{a} = -\frac{KM}{r^3} \vec{r}$$

C ha escrito (2) en su cuaderno. La ecuación corresponde a la aceleración que sufre un cuerpo rígido por la acción de un cuerpo de masa M . La ha obtenido a partir de la ley de gravitación universal, que ha aplicado al caso de dos cuerpos. Ha calculado la fuerza que la Tierra ejerce sobre cualquier cuerpo rígido considerando que la Tierra tiene simetría esférica (ha hecho uso de S.2.). Después ha escrito T.3) y ha sustituido la fuerza por la expresión que liga su aceleración y su masa. De nuevo, es posible demostrar la subrutina desde el principio. Pero la ciencia *cuenta* con su verdad, verdad que se supone ligada a las premisas iniciales que conforman los pilares de la teoría. Si las tres primeras leyes son verdaderas, su función de verdad (=1) pasa a través de todas las ra-

III. MODELOS DE MECÁNICA CLÁSICA

mificaciones. De la verdad de las premisas se sigue la verdad de las conclusiones, deductivamente.

C ha escogido los pilares de su modelo, los enunciados teóricos. Éstos no vienen en su forma más abstracta, sino ya aplicados al caso particular, aunque de forma muy genérica todavía. Se han hecho algunas simplificaciones, pero no las suficientes para resolver el problema. C sustituye \vec{a} en (1) por su expresión en (2), y queda:

$$(3) \quad \vec{a}' = -\frac{KM}{r^3} \vec{r} - \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) - 2\vec{\omega} \times \vec{v}'$$

El paso de (1) y (2) a (3) se efectúa mediante una operación perfectamente definida en el álgebra. Esta operación está permitida en el lenguaje de la Física, pero a pesar de su aparente sencillez supone buena parte del Álgebra: desde Teoría de conjuntos, relaciones de equivalencia y orden, leyes de composición interna, grupos, anillos, cuerpos, hasta llegar a la definición de un espacio vectorial donde tenga sentido semejante operación. La fundamentación de cualquier tipo de operación requiere un análisis profundo de lo que es un sistema vectorial. Aquí sí que tiene sentido hablar de una regla de deducción, como regla algebraica, basada en la combinatoria de los signos.

C introduce ahora la siguiente suposición, distinta de las cuatro primeras:

S.5) Para el caso considerado, un proyectil, las distancias que alcanza sobre la superficie de la Tierra son muy pequeñas en comparación con el radio de la Tierra (menores que $R_t/1000$, aproximadamente).

C está pensando " $r \approx R_t$ ", pero el signo " \approx " no pertenece a ninguna operación definida en el álgebra⁸⁶. " \approx " significa "aproximadamente", "casi igual", pero esto no es algo definible dentro del lenguaje estrictamente matemático⁸⁷. El significado de " \approx " es fundamentalmente físico, y va acompañado de un error que se puede medir estadística-

⁸⁶ Otros símbolos que se utilizan con el mismo sentido son " \cong " o " \sim ". Con ellos se quiere indicar que hay "una buena aproximación".

⁸⁷ Lo único "parecido" es el concepto de límite, pero que, como luego veremos, Cap. VIII, § 8.3, indica otra cosa completamente distinta, y en ningún caso se deberían confundir.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

mente, y cuya tolerancia es lo bastante pequeña como para admitir la sustitución. Sea entonces

$$g = KM/R_t^2 = 9,8346m/s^2 ,$$

el módulo de la aceleración de la gravedad en las proximidades de la Tierra, si la Tierra estuviese inmóvil. El valor de g viene empíricamente determinado a través de distintos procesos de medida, y constituye un dato del problema, un dato de observación en sentido estricto, porque asigna un valor real, expresado en unidades dimensionales, a una aceleración que hasta el momento era genérica.

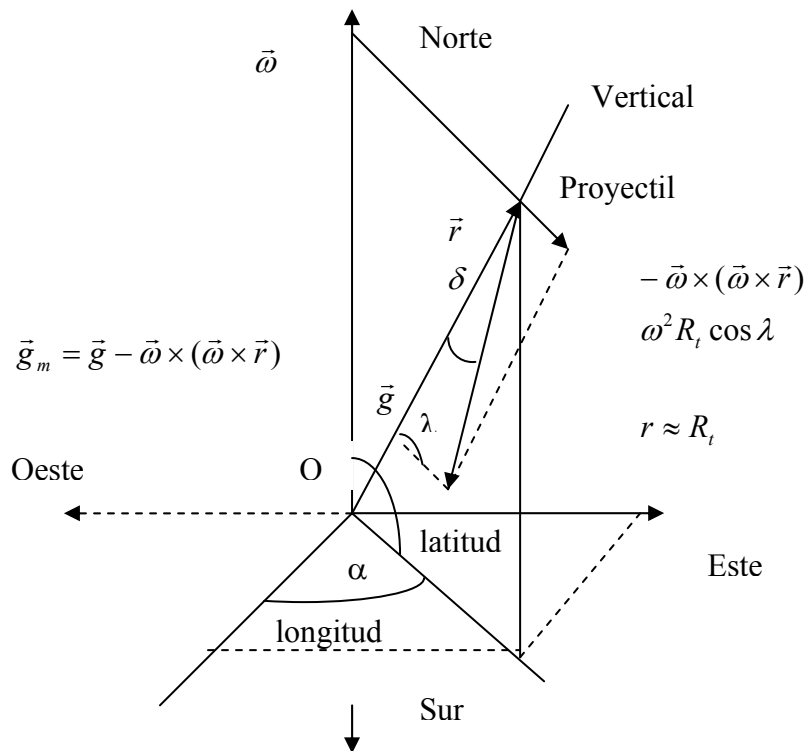


Figura 3.1

A partir de la *Figura 3.1*⁸⁸ podemos deducir los efectos que la rotación de la Tierra tiene sobre la aceleración de la gravedad, y que dependen de la latitud λ del proyectil: por un lado, producir una variación del módulo que g tendría si la Tierra estuviese in-

⁸⁸ Fuente: Alonso y Finn (*op. cit.*, pp. 131-134), Aguinaga (*op. cit.*, VI-30).

III. MODELOS DE MECÁNICA CLÁSICA

móvil; y, por otro, variar su dirección a lo largo de la vertical a la superficie de la Tierra en la latitud λ del proyectil. Se puede comprobar que

$$\begin{aligned}\operatorname{sen} \delta &\cong 1,7 \times 10^{-3} \operatorname{sen} 2\lambda \cong \delta \text{ rad} \\ g_m &= g(1 - 3,4 \times 10^{-3} \cos^2 \lambda),\end{aligned}$$

lo que indica que tanto δ como $(g_m - g)$ son muy pequeños.

La ecuación (3) puede escribirse como:

$$(4) \quad \vec{a}' = \vec{g}_m - 2\vec{\omega} \times \vec{v}' ,$$

donde \vec{g}_m es la aceleración de la gravedad en las proximidades de la Tierra teniendo en cuenta los efectos de la rotación de la Tierra.

Por otra parte, **C** comienza ahora *otra demostración* (cf. Aguinaga, *op. cit.* VI-31):

“Si O' (*Figura 3.2*) el punto de lanzamiento del proyectil y P el punto de impacto del proyectil sobre la superficie de la Tierra, el arco de circunferencia $O'P$ sería

$$\text{arco } O'P = R_t \beta$$

donde β es el ángulo en radianes que el arco $O'P$ subtiende en el centro de la Tierra. La distancia horizontal del punto P al punto O' es igual a la perpendicular desde P al radio del centro de la Tierra C al punto de lanzamiento O' , y

$$d = R_t \operatorname{sen} \beta$$

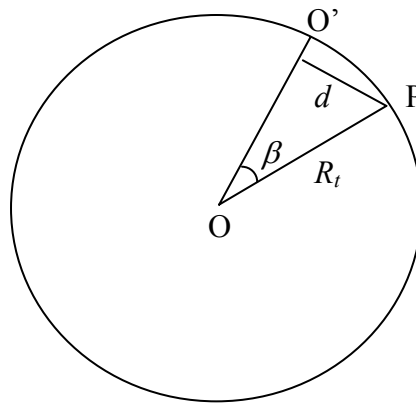


Figura 3.2

Para un proyectil el ángulo β es lo suficientemente pequeño para que $\text{sen}\beta = \beta$ y, entonces,

$$d = R_t \beta = \text{arco } O'P$$

Así, se puede *despreciar* la curvatura de la superficie de la Tierra y la variación \vec{g}_m en módulo y dirección durante el vuelo del proyectil. Además, como el ángulo δ es muy pequeño, *se puede considerar* que \vec{g}_m es paralelo a la vertical de la superficie de la Tierra en el punto de lanzamiento del proyectil O' durante todo el vuelo del proyectil.”

Reconstruyamos ahora el fenómeno teniendo en cuenta lo dicho anteriormente. Con origen en el punto de lanzamiento O' de longitud α y latitud λ construimos el sistema de referencia $O'XYZ$ que se ilustra en la *Figura 3.3*.⁸⁹

⁸⁹ Fuente: Aguinaga, *ibid.*, VI-32.

III. MODELOS DE MECÁNICA CLÁSICA

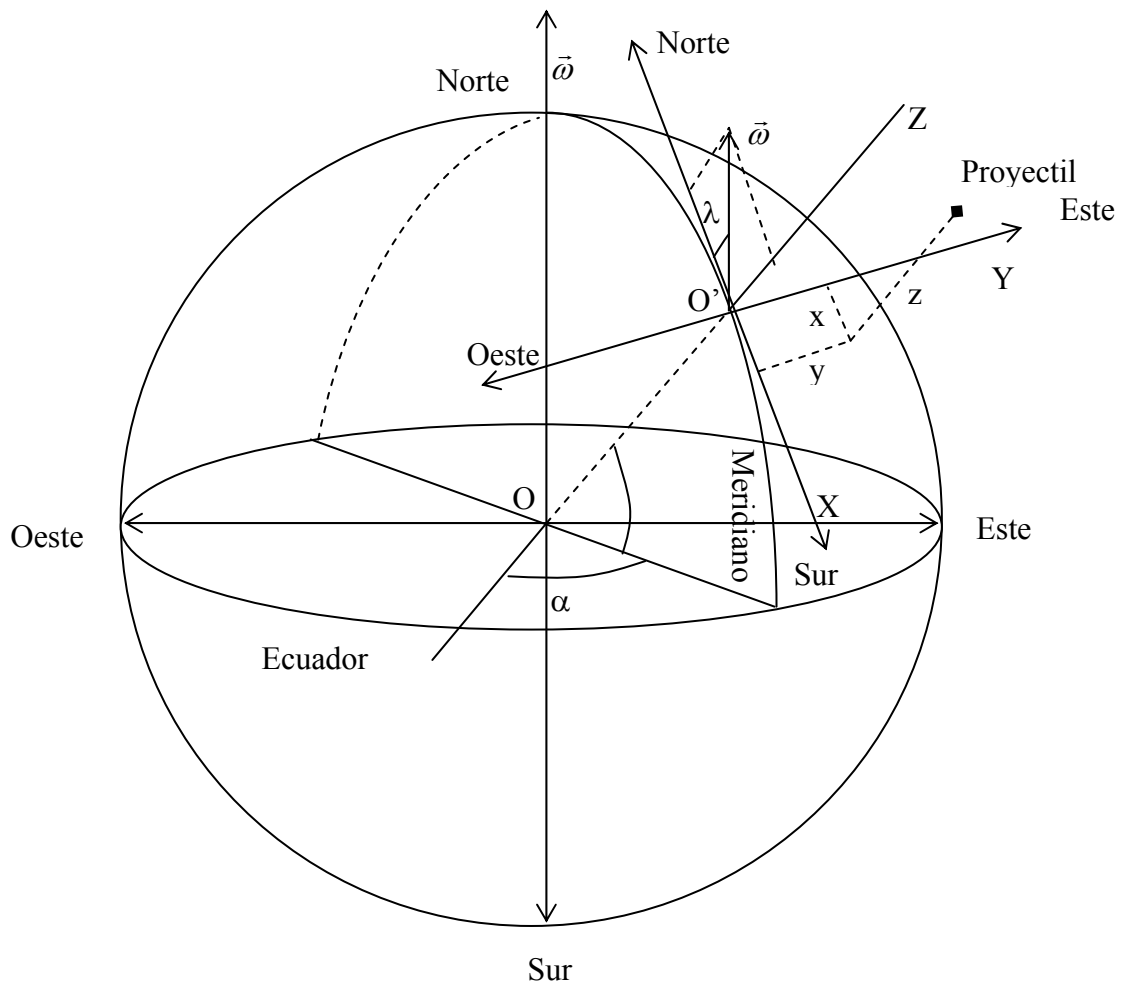


Figura 3.3

El eje X es tangente en O' al meridiano de longitud α y su sentido positivo señala hacia el Sur. El eje Y es perpendicular en O' al plano XZ , que corresponde al plano meridiano de longitud α , y su sentido positivo señala el Este. El eje Z es normal a la superficie de la Tierra en el punto O' y su sentido positivo es hacia arriba. Entonces,

$$\vec{\omega} = -\omega \cos \lambda \vec{i} + \omega \sin \lambda \vec{k},$$

donde $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ son los vectores normalizados de los ejes X, Y, Z . También sabemos, por Cinemática,

$$\vec{v}' = \dot{x}\vec{i} + \dot{y}\vec{j} + \dot{z}\vec{k}$$

$$\vec{a}' = \ddot{x}\vec{i} + \ddot{y}\vec{j} + \ddot{z}\vec{k}$$

y según lo explicado en la última de las demostraciones o *subrutinas*,

$$\vec{g}_m = -g_m \vec{k},$$

donde g_m corresponde al valor de la aceleración de la gravedad en la latitud λ .

A partir de aquí, se deduce fácilmente que

$$\vec{\omega} \times \vec{v}' = -\omega \dot{y} \sin \lambda \vec{i} + (\omega \dot{x} \sin \lambda + \omega \dot{z} \cos \lambda) \vec{j} - \omega \dot{y} \cos \lambda \vec{k}$$

Por último, sustituyendo esta expresión en la ecuación (4) obtenemos (cf. Aguina-
ga, *ibid.*, VI-33):

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x} &= 2\omega \dot{y} \sin \lambda \\ \ddot{y} &= -2\omega \dot{x} \sin \lambda - 2\omega \dot{z} \cos \lambda \\ \ddot{z} &= -g_m + 2\omega \dot{y} \cos \lambda \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

donde g_m , ω y λ se consideran constantes durante el vuelo del proyectil.

Este conjunto de ecuaciones *describe* el movimiento de un proyectil, y permite *predecir* sus posiciones en función del tiempo, dada su posición y su velocidad inicial. Hemos obtenido un modelo deductivamente, a partir de un conjunto de enunciados teóricos, más una serie de condiciones iniciales, suposiciones y simplificaciones. La descripción, en todo caso, no es exacta, porque el modelo no puede tener en cuenta todas las circunstancias particulares que tienen lugar en la realidad. En este sentido, se habla de una descripción ideal, o simulación, aunque yo prefiero utilizar la palabra *síntesis*. Cabe decir entonces que *el modelo, dada una información disponible (teórica y observacional), sintetiza el comportamiento del fenómeno*.

En definitiva, podemos considerar a \mathbf{T} como un sistema jerarquizado de axiomas y teoremas. En los pilares de \mathbf{T} están las leyes fundamentales aceptadas por una comunidad científica, y figuran (o figurarían potencialmente) en las primeras premisas para toda demostración de una ley y para toda predicción de un hecho. El paso de los axio-

III. MODELOS DE MECÁNICA CLÁSICA

mas a los teoremas se realiza mediante simplificaciones razonables e idealizaciones (sistemas aislados, planetas como esferas, constantes, etc.). **T** tiene también resueltos ciertos problemas tipo, procedimientos generales y resultados notables, que permiten aplicarse a un rango muy variado de fenómenos. Los científicos, para la construcción de sus modelos, toman de **T** lo que necesitan: principios fundamentales, teoremas, o modelos más abstractos que se particularizarán en otros fenómenos.

Las situaciones a las que puede enfrentarse un científico son muy variadas, y **T** proporciona las reglas generales básicas para la representación de la realidad física. La construcción de una teoría, y de una ciencia en general, se realiza dando por verdaderas ciertas premisas sobre las que se van construyendo nuevos principios, demostrando y comprobando empíricamente su funcionamiento. Igualmente, a la teoría **T** se le incorporan nuevas leyes de menor nivel o se deducen directamente, en cuyo caso se experimentan sus consecuencias en la realidad⁹⁰.

Los modelos tienen diversos niveles de generalidad, dependiendo del estatuto de las leyes que lo construyan. En el ejemplo anterior, hemos llegado a las ecuaciones que relacionan la aceleración del proyectil con su velocidad, la aceleración de la gravedad, la latitud y la velocidad angular de la Tierra. Se ha supuesto que la Tierra gira y que el aire no ofrece resistencia: es el modelo M_1 . Se podría construir otro modelo donde la Tierra estuviera completamente inmóvil, y el aire siguiera sin ofrecer resistencia: basta-

⁹⁰ El convencionalismo que sostiene toda la ciencia fue convenientemente subrayado por Poincaré, aunque no siempre de la misma manera. En Poincaré (1993) el convencionalismo es *moderado*, pues admite que las leyes científicas no son inmunes a la experimentación. Así (*op. cit.*, pp. 59 y ss.), refiriéndose a los resultados del experimento de Michelson y Morley, defiende que cuando las dificultades se acumulan hay que buscar hipótesis más sencillas en vez de, por pretender salvar los antiguos principios, introducir toda suerte de enunciados añadidos que en realidad complican más las cosas en un tiempo donde la comunidad científica desconfía de las antiguas leyes. En estas épocas de crisis, para Poincaré, se pueden salvar unos cuantos principios, pero no todos: hay que sacrificar algunos.

Sin embargo, en su obra *Ciencia e hipótesis*, no parece que estos principios sean revisables. Por ejemplo, Poincaré (2002, p. 176): “Si esos postulados poseen una generalidad y una certeza que no poseen las verdades experimentales de donde se han obtenido, es porque en último análisis se reducen a una simple convención que tenemos derecho a hacer, porque de antemano estamos seguros de que ninguna experiencia habría de contradecirlos”. Y un párrafo después añade: “Así se explica cómo la experiencia ha podido edificar los principios de la mecánica y por qué, sin embargo, no los podría destruir”.

Por mi parte, afirmo que los principios teóricos que construyen los modelos son *convencionales*, pero *no arbitrarios*, y, en todo caso, siempre *revisables*.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

ría con hacer $\vec{a}' = \vec{a} = \vec{g}$, para calcular posteriormente las ecuaciones de la parábola, la máxima altura que alcanzaría el proyectil, y su alcance. Sería el modelo M_2 . También podríamos suponer que la Tierra está quieta, pero que el aire sí ofrece una resistencia. Si la resistencia del aire fuera proporcional a la velocidad \vec{v} del proyectil. La ecuación del movimiento sería:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = -mg\vec{k} - q\vec{v},$$

donde \vec{k} es un vector unitario vertical hacia arriba y q es una constante de proporcionalidad que se mide en N/m/s o kg/s. Éste constituiría nuestro tercer modelo, M_3 . Un cuarto modelo, M_4 , podría tener en cuenta la presión y la temperatura del aire (cuyos efectos son tan importantes que combinados con la aceleración de Coriolis producen ciclones). Qué modelo se use depende de la magnitud que se quiera hallar y de la precisión que sería aceptable para **C**. En todo caso, siempre se ha de jugar con los grados de libertad de las ecuaciones y con la pérdida de exactitud que se produce al simplificar por aproximaciones⁹¹.

⁹¹ Cuando me refiero a que existe una jerarquía entre los modelos no quiero decir que el modelo M_4 sea más fundamental que M_2 , por ejemplo, ya que las aproximaciones y factores de corrección dependen del caso particular que se está estudiando. Para un modelo que predijera ciclones no tener en cuenta la temperatura y la presión del aire sería una mala simplificación, mientras que para otro que quisiera calcular el alcance máximo de una catapulta en un lugar donde el aire apenas se mueve, puede tener sentido proceder a la anulación del término que expresa su resistencia. La elección de un modelo sobre otro se realiza a partir de las condiciones iniciales que describen el problema, las cuales indican los factores relevantes para el fenómeno en cuestión. Hay que tener en cuenta aquello que se va a *notar más*, aquello que tiene un efecto mayor en el conjunto de variables, dentro de una precisión aceptable de la que el científico parte. Así, la justificación de un modelo sobre otro no es absoluta, y las buenas o malas aproximaciones dependen del caso en particular.

Sin embargo, la jerarquía entre modelos existe desde el momento en que para poder escribir ciertas ecuaciones tiene que darse necesariamente el antecedente especificado por la ley, esto es, las condiciones donde la ley resulta válida. Hay leyes que se subordinan a otras, que presuponen leyes más generales de orden superior cuya verdad tiene que ser, al menos, supuesta, para poder ser justificadas deductivamente y saber así “de dónde vienen”. Sin las tres leyes de Newton, difícilmente hubiéramos obtenido las ecuaciones del proyectil.

III. MODELOS DE MECÁNICA CLÁSICA

La Mecánica newtoniana constituyó un formidable instrumento para la elaboración de modelos descriptivos. La realidad física es reducida a una taxonomía de casos de acuerdo con lo precisado por la teoría. Se parte de puntos-masa, partículas, definiéndose su trayectoria, velocidad y aceleración, y clasificando los movimientos de acuerdo con estas definiciones. Del punto se pasa al cuerpo rígido, al que se considera como un sistema de puntos cuyas distancias permanecen constantes, y donde las condiciones de ligadura limitan su movimiento. Las rotaciones, traslaciones y combinaciones de movimiento se resuelven tratando de reducir el sistema a los modelos anteriores resueltos. En todo momento las ecuaciones son aplicables a la realidad, y en todo momento los conceptos que intervienen (ángulos de Euler, tensores, productos de inercia) se refieren a la realidad física de inmediato, y no necesitan ningún tipo de interpretación: son abstracciones, idealizaciones, pero no por ello pierden contacto con la realidad: al contrario, la *sintetizan*, la expresan en su forma más exacta, breve y resumida, para poder operar con sus cantidades.

Distintos sistemas físicos pueden ser expresados con las mismas ecuaciones, y una misma ecuación adopta formas distintas según el eje de coordenadas escogido y según el tipo de coordenadas que se considere más apropiado. Estos sistemas no son incompatibles entre sí; al contrario, resultan equivalentes, se refieren a la misma esencia, son los mismos esquemas físicos, descriptivos, explicativos, predictivos, donde ningún concepto está aislado de los demás y todos se relacionan en las leyes y definiciones.

3.2. Recapitulación

Dada una información teórica y observacional, un modelo teórico es una descripción ideal que permite reproducir (hasta cierto punto) una serie de datos experimentales y adelantarnos al comportamiento de un fenómeno. Un modelo es una reconstrucción racional de la realidad, una representación ordenada de lo que hasta la fecha conocemos de un fenómeno. Cuando el modelo está justificado teóricamente, la teoría proporciona una serie de reglas metodológicas para construirlo, aunque el problema nunca se resuelva mecánicamente, sino a través de suposiciones físicas sobre la naturaleza del fenómeno. A partir de un conjunto de ecuaciones teóricas y de una serie de enunciados aceptados de observación, el científico simplifica las ecuaciones mediante una serie de

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

aproximaciones más o menos justificadas, que dependen de la naturaleza del problema, y que son consideradas aceptables dentro de unos márgenes de tolerancia permitidos, según el orden de magnitud del error y de acuerdo a la precisión que se desea para la resolución del problema.

La serie de los distintos modelos que se pueden obtener a partir de las ecuaciones principales se ordena de manera jerárquica, deductivamente, en el sentido de que unos modelos se basan en los resultados de otros para no tener que comenzar siempre desde el principio. La ciencia cuenta con la verdad de ciertas leyes y teoremas, que guarda como *stock* de enunciados que un científico puede utilizar cuando desee, siempre que conozca o reproduzca las condiciones de aplicabilidad de los mismos, el conjunto de condiciones experimentales donde tienen un significado preciso. Una ley es un enunciado condicional que especifica las situaciones ideales donde resulta de máxima utilidad, por lo que no tiene sentido apelar a cláusulas *ceteris paribus* para indicar *a posteriori* lo que la teoría, como conjunto de leyes, va especificando mientras avanza en el cálculo de teoremas y en la formación de sus modelos principales. En este sentido, una teoría puede considerarse como una especie de conjuntos ordenados de rutinas y subrutinas en los que se resuelven los problemas o casos típicos con los que un científico se enfrenta habitualmente. El objetivo es doble: por una parte, reduce los nuevos problemas a los modelos ya conocidos, en un análisis de la realidad que la descompone en modelos básicos de comportamiento; y por otra parte, desde el punto de vista lógico, se asegura que la presunta verdad de los primeros principios recorra deductivamente todo el cuerpo lógico de la teoría, desde los modelos más fundamentales y de mayor alcance, hasta los modelos derivados, o de más bajo nivel.

En todo caso, la serie de aproximaciones con las que se derivan sucesivamente los modelos no puede considerarse justificada matemáticamente, a partir de la teoría de límites o sucesiones, por ejemplo, sino físicamente, mediante razonamientos que tienen en cuenta el significado de una buena o mala simplificación, y el error que arrastran las distintas suposiciones. Lo ideal es establecer un *equilibrio* entre el rigor teórico, proporcionado por las ecuaciones, y el poder predictivo, que se obtiene gracias a las simplificaciones, en el sentido de que sea posible calcular algún resultado. La comparación se efectúa únicamente entre resultados predictivos y resultados experimentales, o medidas directas, y no entre estructuras globales. Es decir, *la comparación tiene sentido entre datos numéricos*, de los que posteriormente es posible indicar el error estadístico que

III. MODELOS DE MECÁNICA CLÁSICA

lleva asociado el modelo como consecuencia de la discrepancia entre nuestras predicciones y las medidas experimentales.

CAPÍTULO IV

MODELOS ESTRUCTURALISTAS

4.0. Introducción

Dirijo ahora mi atención, dentro del recorrido general por las posiciones fundamentales sobre modelos en Filosofía de la Ciencia, a la versión estructuralista de las teorías, a través de Sneed (1971), Stegmüller (1981) y Moulines (1982). Su propuesta, siguiendo las indicaciones de Suppes o el grupo Bourbaki, consiste en axiomatizar informalmente las teorías científicas, mediante predicados conjuntistas, sin recurrir a lenguajes formales como el de Carnap. Se trata de axiomatizar la teoría, e identificar después la clase de modelos que satisfacen el predicado que la define; la teoría queda así caracterizada extensionalmente por la clase de modelos que satisfacen los axiomas. El principal objetivo de este capítulo es criticar la idea de que nuestros modelos, cuando son adecuados, son isomórficos a las estructuras de la naturaleza.

La Sección 4.1: “La estructura de los núcleos teóricos”, muestra como ejemplos de axiomatización conjuntista la Mecánica Clásica de partículas, la Cinemática de partículas y la Dinámica Newtoniana, distinguiendo entre los modelos como entidades lingüísticas y los modelos como realizaciones. Otras características fundamentales del estructuralismo, además del isomorfismo, son los campos restringidos de aplicación de la teoría, los modelos paradigmáticos y posibles como parte fundamental de las teorías y la distinción entre términos T-teóricos y T-no-teóricos.

La Sección 4.2: “Crítica del isomorfismo (I)”, constituye mi primera objeción al isomorfismo como modo válido de representación. Después de criticar la distinción entre términos T-teóricos y términos T-no-teóricos, y resumir la crítica que Suárez (2003) realiza al isomorfismo y la similaridad como formas necesarias y suficientes para elaborar una caracterización sustantiva de la representación, presento mis motivos para re-

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

chazar el isomorfismo como constituyente básico de la relación entre los modelos y la realidad. Defiendo que la naturaleza no está definida como estructura algebraica antes de que la ciencia se la represente *como si* fuera un sistema. Este “como si” es una suposición básica metodológica que posibilita la representación y que en ningún caso implica que la realidad sea sistematizable de una única manera. Presento nuevos ejemplos de sistemas equivalentes que representan una única realidad física y que suponen distintas maneras complementarias de considerar extensionalmente un mismo fenómeno, sin que ninguno de ellos sea más “verdadero” o “ficticio” que los demás. La relación de isomorfismo está definida entre estructuras algebraicas, y la naturaleza no puede definirse extensionalmente, como una serie de elementos fijos e inmutables para siempre. Defiendo que hay infinitas maneras de representar un único fenómeno, y que la elección de estos sistemas depende del interés práctico que un científico pueda tener a la hora de calcular ciertas magnitudes. Después de desarrollar ciertas características que presentan estos sistemas equivalentes, como la complementariedad, su relación estricta de equivalencia y la ausencia de error a la hora de sustituir un sistema por otro, reitero mi posición fundamental de considerar los modelos como síntesis que no se pronuncian respecto de la mayor o menor realidad de unos sistemas frente a otros, y que se dedican a suministrar en sus ecuaciones la información física disponible hasta la fecha.

La Sección 4.3: “Relativismo e inconmensurabilidad”, aborda las consecuencias de abandonar la búsqueda de una única estructura de la realidad, en relación con la problemática del relativismo y la objetividad de la representación científica. Coincido con Munévar (1998) en que no hace falta apelar a razones culturales o sociológicas para defender que la realidad puede estructurarse de maneras distintas, según la sensibilidad y los esquemas de percepción que permiten visualizar el mundo, pero rechazo que el principio de relatividad cognitiva afecte a los conceptos fundamentales científicos. La incompatibilidad entre teorías no significa que sean “inconmensurables” entre sí, puesto que existe un lenguaje fisicalista neutral que posibilita la comparación racional y garantiza la referencia de los términos científicos. Por último, defiendo que la creencia en un relativismo respecto de los objetos físicos, entendidos como sustratos lógicos a los que se adscriben ciertas propiedades físicas, no significa la creencia en un relativismo acerca de las leyes fundamentales de la Física, ya que éstas se limitan a relacionar magnitudes que se sitúan al margen de cualquier relativismo cultural o neuropsicológico.

IV. MODELOS ESTRUCTURALISTAS

4.1. La estructura de los núcleos teóricos

Para el estructuralismo, como indica Sneed (1971, p. 11), “axiomatizar una teoría matemática es determinar una clase de entidades teórico-conjuntistas”. La teoría matemática se caracteriza entonces por la clase de modelos que satisfacen la axiomatización informal, y deja de ser definida mediante axiomas, términos básicos y reglas de derivación.

En McKinsey, Sugar y Suppes (1953) hay una aplicación de esta estrategia a la Mecánica clásica de partículas (MCP); la definición del predicado conjuntista “ser MCP” se realiza de la siguiente manera:

X es una MCP si y sólo si existen P, T, \bar{s}, m y \bar{f} tales que:

- 1) $X = \langle P, T, \bar{s}, m, \bar{f} \rangle$;
- 2) P es un conjunto finito no vacío;
- 3) T es un intervalo de números reales;
- 4) \bar{s} es una función $P \times T$ en el conjunto de ternas ordenadas de números reales tales que, para todo $p \in P$ y para todo $t \in T$ existe la derivada segunda de la función \bar{s} , $D^2 \bar{s}(p, t)$;
- 5) m es una función de P en los números reales tal que para todo $p \in P$ es $m(p) > 0$;
- 6) \bar{f} es una función de $P \times T \times I$ en el conjunto de ternas ordenadas de números reales tal que, para todo $p \in P$ y para todo $t \in T$, $\sum_{i \in I} \bar{f}(p, t, i)$ es absolutamente convergente;
- 7) Para todo $p \in P$ y para todo $t \in T$ es válida la ecuación:

$$m(p) \cdot D^2 \bar{s}(p, t) = \sum_{i \in I} \bar{f}(p, t, i)$$

Para la definición de MCP se utilizan los conceptos de masa (m), tiempo (t), partícula (p), posición (s) y fuerza (f). Ninguno de estos términos está definido mediante reglas de correspondencia, sino que se considera globalmente la clase de modelos M que satisfacen la estructura de MCP. La teoría resulta entonces ser aplicable en unos campos

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

y en otros no, sin quedar por lo tanto refutada. Los sistemas que no cumplen los axiomas de la teoría simplemente no son modelos suyos, mientras que otros sí lo serán.

Más aún, según Sneed, si quitáramos la condición 7) de MCP, que hace referencia a la segunda ley de Newton, obtendríamos un nuevo predicado conjuntista, que definiría el predicado “*Y es una Mecánica de partículas*”. Extensionalmente, la clase de modelos que satisfacen el nuevo predicado MP será necesariamente más amplia que la clase anterior M que satisfacía MCP, puesto que hemos eliminado una condición tan fuerte como 7). Si llamamos M_p a la nueva clase de modelos que satisface el predicado conjuntista MP (las seis primeras condiciones), M_p constituye la serie de modelos potenciales de la Mecánica Clásica de partículas, es decir, posibles candidatos a formar parte de MCP siempre que en ellos se cumpla la segunda ley de Newton.

Una novedad del enfoque de Sneed es el replanteamiento de la cuestión de los términos teóricos y observacionales⁹². En MCP, por ejemplo, la masa es un término teórico, porque supone un modelo de MCP donde puede medirse. Lo mismo sucede con la fuerza, pero no así con la posición o con el tiempo, que pueden ser definidos mediante otros medios distintos a los que ofrece la segunda ley de Newton (por ejemplo, la óptica o la geometría física). Los conceptos teóricos son entonces relativos a una teoría, y no constituyen una distinción absoluta como en el positivismo lógico. En el caso de MCP, Sneed procede a eliminar de los axiomas los conceptos T-teóricos, lo que define un tercer predicado conjuntista:

Z es una cinemática de partículas (CP) si y sólo si existen P, T, \bar{s} , tales que:

1) $Z = \langle P, T, \bar{s} \rangle$

2) P es un conjunto finito no vacío;

3) T es un intervalo de números reales;

4) \bar{s} es una función $P \times T$ en $R \times R \times R$ tal que, para todo $p \in P$ y para todo $t \in T$ existe la derivada segunda de la función \bar{s} , $D^2 \bar{s}(p, t)$.

La clase de modelos que satisfacen las condiciones de Z , y constituyen, por tanto, una cinemática de partículas, es designada por Sneed (*op. cit.*, p. 165 y ss.) la clase de

⁹² Cf. Sneed (*op. cit.*, pp. 45-46, 162). Para la problemática de las funciones teóricas en relación con el enunciado de Ramsey, consúltese Rivadulla (1986, Estudio VII). Véase también Diez y Moulines (1997, pp. 350-366).

IV. MODELOS ESTRUCTURALISTAS

los modelos potenciales parciales, M_{pp} , como tercer componente estructural de MCP, y que caracteriza a los términos MCP-teóricos de los MCP-no teóricos. Más precisamente, un concepto de una teoría es no-teórico si y si sólo si ocurre que en todas sus aplicaciones los valores de las funciones correspondientes al concepto pueden ser obtenidos sin aplicar la teoría. El concepto será teórico cuando sea necesario recurrir a alguna aplicación de la teoría. La relatividad de esta distinción no se refiere solamente a cada teoría en particular, sino también al tiempo, pues es posible que los conceptos teóricos pasen a ser no-teóricos por el desarrollo de nuevos métodos de medida.

Junto a M , M_p , M_{pp} , existe una cuarta componente del núcleo de una teoría, las condiciones de ligadura (*constraints*), C , que especifican reglas de interdependencia entre los modelos posibles de una teoría, y los relacionan entre sí (cf. Sneed, *op. cit.*, p. 66). Por ejemplo, en los sistemas planetarios donde se cumpla la Mecánica Clásica de partículas, es necesario que la masa de los objetos particulares no varíe, y que sea idéntica en todos los modelos que lo incluyan. Otras condiciones podrían ser las referidas a la invariancia respecto de las transformaciones de Galileo o la extensividad de la función masa⁹³. Los posibles modelos, entonces, no resultan entes aislados, sino que forman parte de una misma familia, de manera que la investigación depende de lo que anteriormente se ha realizado en otros campos.

Con todos estos elementos, podemos generalizar a cualquier teoría física la concepción estructuralista de las teorías. Primeramente, definimos una *matriz teórica* mn ⁹⁴:

X es una matriz teórica mn si y sólo si

1) X es un conjunto.

2) $x \in X$ si y sólo si hay $D_1, D_2, \dots, D_m; f_1, f_2, \dots, f_n$, tales que

a) $x = \langle D_1, \dots, D_m; f_1, \dots, f_n \rangle$

b) $\forall D_i; 1 \leq i \leq m, D_i \neq \emptyset$

c) $\forall i, 1 \leq i \leq n, \exists j, k, 1 \leq j, k \leq m$, tales que $f_i \subset D_j \times D_k$

⁹³ Cf. Mosterín (*op. cit.*, 167).

⁹⁴ Cf. Armero y Rada (1989, p. 60).

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Que $x \in X$ significa que x es una m -tena de dominios y recorridos de n -tena relaciones o funciones. A continuación, expresemos mediante otro predicado conjuntista la definición de *núcleo teórico*.

X es un núcleo teórico si y sólo si:

$$1) X = \langle M_p, M_{pp}, r, M, C \rangle$$

2) M_p es una matriz teórica mn .

3) Hay algún $k \leq m$ tal que

$$M_p = \langle D_1, \dots, D_m; f_1, \dots, f_k \rangle / \langle D_1, \dots, D_m; f_1, \dots, f_k, f_{k+1}, f_n \rangle \in M_p$$

4) $r: M_p \rightarrow M_{pp}$ de manera que

$$r(\langle D_1, \dots, D_m; f_1, \dots, f_k, \dots, f_n \rangle) = \langle D_1, \dots, D_m; f_1, \dots, f_k \rangle;$$

5) $M \subseteq M_p$

6) C es una condición de ligadura para M_p .

M_p son los modelos posibles de la teoría; M_{pp} es la clase de los modelos parciales posibles, aquellos que resultan de eliminar de los modelos posibles las funciones de sus conceptos teóricos. La función r proyecta, a partir del conjunto inicial de modelos posibles, los modelos parciales posibles. Por otra parte, 5) indica que entre los modelos posibles hay algunos que son modelos efectivos de la teoría. En 6) se relacionan los modelos posibles mediante las condiciones de ligadura.

Frente al modelo general de Popper (1983) o Carnap (1966), donde las leyes son de aplicación universal, Sneed piensa que las teorías tienen campos restringidos de aplicación, dominios donde pueden resultar verdaderas. Así, distingue entre las teorías, las aplicaciones de las teorías y las afirmaciones empíricas de las teorías. Las aplicaciones que una teoría propone son subconjuntos de sus modelos parciales posibles. Dado un núcleo teórico, K , el conjunto de las aplicaciones posibles $A(K)$ se define⁹⁵:

1) $R: \text{Partes de } M_p \rightarrow \text{Partes de } M_{pp}$, tal que $R(X) = \text{df } r(X)$ para $X \in \text{Partes de } M_p$.

2) $R': \text{Partes de partes de } M_p \rightarrow \text{Partes de partes de } M_{pp}$, tal que $R'(X') = \text{df } R'$ para $X' \in \text{Partes de partes de } M_p$.

3) $A(K) = \text{df } R'((\text{Partes de } M) \cap C)$.

⁹⁵ Cf. Armero y Rada (*op. cit.*, p. 61).

IV. MODELOS ESTRUCTURALISTAS

R relaciona conjuntos de modelos posibles con modelos parciales posibles. R' relaciona colecciones de conjuntos de modelos posibles con colecciones de conjuntos de modelos parciales posibles. Las aplicaciones del núcleo teórico son la colección de conjuntos parciales posibles que son asignados por la función r a los modelos que satisfacen las leyes de la teoría y las condiciones de ligadura. Así, las aplicaciones no son más que los conjuntos de modelos que satisfacen las leyes y se relacionan entre sí por medio de *constraints*. ¿Qué es una teoría, entonces?

X es una teoría si y sólo si hay K e I tales que

- 1) $X = \langle K, I \rangle$
- 2) K es un núcleo teórico.
- 3) $I \in M_{pp}$

La tesis fundamental es que $I \in A(K)$, al conjunto de aplicaciones propuestas⁹⁶.

Estas *intended applications*, el *empirical claim* del que habla Sneed, recoge la idea de Kuhn de las aplicaciones paradigmáticas, aquellos dominios donde la teoría es capaz de proporcionar una explicación satisfactoria, de forma que los sistemas son modelos iniciales de la teoría. En el caso de la Mecánica Clásica, los sistemas de las mareas, los péndulos, la caída libre de los cuerpos o el sistema planetario, serían ejemplos de aplicaciones resueltas con éxito y que procuran una confianza en el núcleo teórico. Los elementos de $A(K)$ han de satisfacer, al menos, las condiciones que definen los modelos parciales posibles, M_{pp} . Dentro de $A(K)$ se incluyen las primeras aplicaciones de la teoría, y que variarán según las circunstancias históricas de su génesis. Aunque no haya reglas que permitan distinguir estas aplicaciones iniciales de las demás, lo importante es que todas ellas forman parte de la estructura de la teoría, de modo que dos teorías con la misma estructura física pueden diferenciarse por los ejemplos propuestos. Sneed (*op. cit.*, p. 119) señala que las aplicaciones no son añadidos *a posteriori* de las teorías, sino parte fundamental de ellas: la misma estructura puede aplicarse a ámbitos distintos, por lo que las teorías no serían equivalentes desde el punto de vista físico. La razón funda-

⁹⁶ Cf. Sneed (*ibid.*, pp. 259 y ss.)

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

mental, sin embargo, es seguir definiendo a la teoría extensionalmente, como el conjunto de modelos donde se cumple lo especificado de modo conjuntista.

El propio Kuhn se mostró interesado en el análisis estructuralista, especialmente por las condiciones de ligadura y las aplicaciones propuestas, entendiendo el paso de la clase de modelos parciales posibles a la clase de modelos posibles como una característica fundamental de la imaginación creadora científica. También propuso que las ligaduras y aplicaciones formaran incluso una parte más esencial del núcleo teórico. Stegmüller amplió el núcleo para recoger las expansiones de la teoría con ayuda de leyes especiales, para formar sucesivamente redes teóricas, constituida por elementos teóricos que se desarrollan históricamente de forma similar a los programas de investigación de Lakatos. Ya que cada elemento teórico expresa una ley fundamental, DNP, la Dinámica Newtoniana de partículas, será un nuevo elemento surgido a partir de MCP, así como de DNP sobrevendrá DARG, la Dinámica de acción y reacción generalizada. Las leyes especiales suponen ampliaciones teóricas que prolongan el contenido empírico del núcleo original y de las primeras aplicaciones⁹⁷.

Para Moulines (1982, pp. 108 y ss.), el análisis de las aplicaciones propuestas no debería olvidar la comunidad científica real de una determinada época, CC, ni el intervalo de tiempo histórico durante el que se aplicaba el núcleo teórico a las aplicaciones. Además, hay una ordenación parcial de los elementos, que se estructuran entre sí para formar redes más amplias, a partir de elementos básicos y ramificaciones arbóreas. Moulines (*op. cit.*, pp. 115 y ss.) define también los conceptos de evolución teórica, progresiva y perfecta, donde los elementos se conectan mediante leyes especiales, dominios supuestos de aplicaciones y dominios firmes de aplicaciones.

La reducción entre teorías tiene lugar dentro de las redes teóricas, por medio de los modelos, y no de las leyes. Cabe hablar de una reducción exacta cuando los modelos de la teoría anterior son derivados de la teoría reductora, y de una reducción de aproximación, mediante n sucesiones de modelos de T y T^n , tal que el límite de estas sucesiones sea isomórfico a su modelo respectivo. Además, los vínculos relacionan las teorías me-

⁹⁷ Stegmüller (1974, p. 525): “Existe una expansión teórica τ del conjunto μ de sistemas físicos a modelos de la estructura matemática S tal que las funciones teóricas utilizadas en esta expansión satisfacen una clase de condiciones de ligadura dadas de antemano y que, además, ciertos subconjuntos propios μ son expansionables a modelos de refuerzos determinados de la estructura S .”

IV. MODELOS ESTRUCTURALISTAS

diante puentes intermodélicos, que ligan los modelos de una teoría con los de otra teoría distinta.

4.2. Crítica del isomorfismo (I)

Llegados a este punto, y a pesar de los logros aparentes, tengo que indicar que buena parte de las pretendidas virtudes de la concepción estructuralista se desvanecen cuando consideramos con mayor profundidad sus premisas básicas:

- i) La teoría se define *extensionalmente* como la clase de sus modelos donde resulta verdadera.
- ii) Si el modelo es adecuado, existe un *isomorfismo* entre estructuras abstractas y estructuras reales.
- iii) Las leyes son de ámbito de aplicación *restringido*.
- iv) Las aplicaciones *forman parte* de la teoría.
- v) Se distingue entre términos *T-teóricos* y términos *T-no-teóricos*, relativos a cada teoría.

Ahora nos interesa, sobre todo, el punto ii), donde se pretende que la representación científica verdadera consista en un *isomorfismo* entre la estructura del modelo y la estructura de la realidad. Sin embargo, no quisiera pasar por alto el punto v), que pretende solucionar los problemas que se le plantean al positivismo lógico a la hora de definir parcialmente los términos teóricos en función de términos observables mediante reglas de correspondencia. Sobre la distinción estructuralista entre conceptos T-teóricos y conceptos no-T-teóricos tengo que decir lo siguiente:

1) *Hay aplicaciones donde el valor de los supuestos términos T-no-teóricos tienen que calcularse a partir de otros términos supuestamente T-teóricos.* En mi ejemplo del Capítulo III, cuando construíamos un modelo newtoniano de un proyectil lanzado con una velocidad inicial, las ecuaciones paramétricas, aquellas que ligan la posición con el tiempo, las obteníamos al final, tras haber aplicado las tres leyes de Newton más la ley de atracción universal. Además, los datos de los que partíamos (los enunciados de ob-

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

servación aceptados) no sólo hacían referencia al radio de la Tierra, o a su velocidad angular, sino también a la aceleración de la gravedad o a la masa de la Tierra. Es decir, hay situaciones donde para calcular la función de los conceptos T-no-teóricos resulta imprescindible la aplicación de leyes que según el estructuralismo se introducen en teorías posteriores. Pensemos en un modelo que relacione la energía gravitatoria y la trayectoria de un cuerpo que varíe inversamente con el cuadrado de la distancia. Según sea el valor de la energía (mayor, menor, o igual a cero) la trayectoria resultará una hipérbola, una elipse o una parábola. El cálculo de los llamados términos no-teóricos puede realizarse mucho después; su valor no tiene por qué conocerse y pasar a los demás modelos mediante “reglas de ligadura”. Es decir, tendríamos que términos T-no-teóricos habrían pasado a términos T-teóricos. ¿Es esto una posibilidad admitida dentro del estructuralismo?

No cabe duda de que las “reglas de ligadura” responden intuitivamente al hecho de que las diferentes medidas y cálculos de ciertas magnitudes se realizan en modelos previos, de menor nivel, a partir de los cuales puede avanzarse en la resolución del problema general mediante pasos intermedios que confluyen hacia la solución final. Pero estas reglas de ligadura, ni se dan mecánicamente, ni es posible especificarlas en su totalidad. Los modos de acceder desde unos modelos hasta otros no se realiza siempre de la misma manera. Para la resolución de un problema, hay que proceder ordenadamente, pero no hay un único método que definiera los vínculos entre unos modelos y otros. En concreto, las reglas de ligadura (que son más bien “subrutinas”, argumentos que se van cancelando y de los que se conserva la conclusión para posteriores cálculos), no pueden hacer que unos términos siempre sean teóricos o que siempre sean no-teóricos. Qué se mide antes y qué se calcula después es algo que no puede decidirse, depende del problema en cuestión, de las condiciones particulares⁹⁸.

⁹⁸ En concreto, es posible imaginar multitud de situaciones donde la masa es un dato conocido, y la dificultad está en calcular la posición o el tiempo a partir de ecuaciones mucho más complejas, incluso, que la segunda ley de Newton. *Los problemas no tienen una única dirección, y la distinción entre términos “teóricos” y “no-teóricos” no depende tanto de la teoría que se utilice como del problema particular que se trate de resolver.* Por ejemplo, tanto Hooke como Newton se preguntaron cuál sería la trayectoria de un cuerpo sometido a una fuerza inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Aquí, se averigua la posición de la Tierra respecto del Sol aplicando la segunda ley de Newton y la fuerza de atracción universal. Aunque Newton supiera (gracias a Kepler) que la curva tenía que ser una elipse, eso no elimina

IV. MODELOS ESTRUCTURALISTAS

2) *El progreso teórico no consiste en la introducción de términos T-teóricos.* Ya que según el estructuralismo cada elemento teórico es introducido por una ley fundamental, da la impresión de que antes de la segunda ley de Newton, por ejemplo, no se conocía ni la fuerza ni la masa, y que, supuestamente, sólo se hacía “Cinemática”. Pero ésta es una afirmación refutable empíricamente por la Historia de la Ciencia, que nos muestra los trabajos de Arquímedes, Herón de Alejandría, ibn-Qurra, Jordano Nemorario, o Juan Filopón, haciendo referencia *exactamente a lo mismo* que hoy conocemos por peso, impulso, empuje o fuerza. ¿O la equivalencia entre un brazo material homogéneo y su centro de gravedad puntual hace referencia a otra cosa distinta? La ingeniería mecánica, las cuestiones hidráulicas, las leyes de la palanca, del plano inclinado, las aplicaciones militares en artillería... ¿Es posible hablar con propiedad de todos estos fenómenos sin referirse a la fuerza, al empuje o al peso? Cuando Descartes y Huygens hacen explícitas las leyes del choque, la ley de inercia y el principio de conservación de la cantidad de movimiento, ¿a qué términos se están refiriendo? Porque Huygens formula la fuerza centrífuga sin necesidad de la fuerza de atracción universal, del mismo modo que Pascal descubre las leyes fundamentales de la Hidrostática apelando al concepto de presión, es decir, a la fuerza por unidad de área. En todos estos casos, ¿el peso, la fuerza y la presión serían T-teóricos? ¿Y que ocurriría con el término “densidad”, del que Aristóteles habla en toda su Física?... *La introducción de los términos teóricos mediante la sucesiva formulación de teorías no se corresponde con la Historia de la Ciencia*, a la que el estructuralismo, presuntamente, pretende ser fiel.

Además, cuando la energía se incorpora a la Mecánica de Newton no pasa como término teórico (como si para su cálculo, definición o explicación necesitara hacer referencia a los términos T-no-teóricos definidos por debajo de ella), sino como un concepto fundamental que cohesiona toda la teoría, y que se sitúa en el mismo nivel de “teoricidad” o “no-teoricidad” que otros términos como la masa, la fuerza, la posición, la aceleración o el tiempo. La energía es un concepto totalmente asumible por la Mecánica Clásica; más aún, *casi una exigencia*, lo mismo que el trabajo, ya que permiten resolver problemas donde se conoce la fuerza en función de la posición. Otro tanto ocurre con la temperatura y el calor, conceptos termodinámicos que en su aplicación a la Mecánica

la “teoricidad” de la posición, tal como el problema fue planteado: había que *demostrar* que la curva era una elipse *a partir de* las tres leyes de la Mecánica, más la ley de atracción universal.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Clásica resultan tan fundamentales como todos los que presuntamente ya estaban “antes” definidos mediante predicados conjuntistas. Aunque una reconstrucción histórica pueda mostrar racionalmente la introducción de los términos termodinámicos en la Mecánica, eso no va a suponer que todos los términos (desde el punto de vista de la teoría completa) dejen de formar un conjunto sobre los que no puede establecerse ningún tipo de prioridad a la hora de decidir cuál de ellos es necesario suponer previamente. Es decir, que *lo teórico y lo no teórico no se pueden definir en función de su incorporación temporal a la teoría*. Esto sería mezclar los contextos de justificación y descubrimiento.

Concluyo este análisis crítico insistiendo en que lo “teórico” y lo “no teórico” son problemas relativos al caso particular, y no son conceptos absolutos, ni siquiera cuando se relativizan para una teoría en particular. Dada una situación, aquello que se pretende calcular es “teórico”, porque su valor se obtiene despejando la incógnita en función de los datos conocidos, únicos términos “primitivos” que hemos de admitir. En un modelo de la teoría cinética de gases puede calcularse la temperatura de un recipiente en función de la temperatura y presión de los demás. Pero la presión y la temperatura, dentro de la teoría cinética, no se definen entre sí, ni uno resulta ser más teórico o empírico que otro.

Dicho esto, paso a ocuparme de la pretensión de isomorfismo entre la estructura del modelo y la estructura del mundo. La relación de isomorfismo está emparentada con la relación de similaridad, y Suárez (2003) analiza la posibilidad de que ambas constituyan lo esencial de la representación. Primero expondré su crítica, con la que coincido fundamentalmente, y después daré mis propias razones para rechazar la noción de isomorfismo y similaridad como partes fundamentales de la representación.

Para Suárez (*op. cit.*, p. 225-226), la ingeniería y la Física matemática muestran una variedad de recursos para la representación: un modelo a escala de un puente, los planos de un puente, un modelo de gas basado en bolas de billar, o una ecuación cuántica de difusión de estado para una partícula sujeta a una medida de localización. Distingue entonces entre la fuente (*source*) y el objetivo (*target*) de la representación. De modo general, la fuente es el vehículo a través del cual el objeto queda representado. Tanto la fuente como el objetivo pueden ser objetos físicos, diagramas, sistemas, modelos,

IV. MODELOS ESTRUCTURALISTAS

imágenes o ecuaciones. La relación de la verdad con los componentes de la representación sería la siguiente:

Si “A representa B” es verdadero, entonces A es la fuente y B es el objetivo.

Una teoría sustantiva de la representación científica tendría que especificar las condiciones necesarias y suficientes para que una fuente A represente a un objetivo B. La intuición que late bajo esta idea es que A, o parte de sus elementos o propiedades, constituye una imagen especular de B, o parte de sus elementos o propiedades. Tanto A como B serían objeto de la investigación científica, y las relaciones entre ambos serían expresadas mediante leyes científicas. En principio, tal concepción naturalista garantizaría la objetividad de la representación, pues se limita a expresar hechos y no tiene en cuenta la subjetividad del investigador.

Dentro de estas teorías sustantivas de la representación, Suárez sitúa a) la concepción de la representación como similaridad, según la cual A representa B si y sólo si A es similar a B; y b) la concepción de la representación como isomorfismo, según la cual A representa B si y sólo si la estructura ejemplificada por A es isomórfica a la estructura ejemplificada por B.

La relación de similaridad es una generalización de la semejanza o parecido, donde dos objetos se asemejan si hay una destacable similaridad entre su apariencia visual. En otros términos, A y B son similares si y sólo si comparten un subconjunto de sus propiedades. Esta propiedad es reflexiva y simétrica, pero no transitiva (A y B pueden ser similares entre sí, igual que B y C, pero A puede no compartir con C ninguna propiedad).

La relación de isomorfismo es una relación matemática entre estructuras extensionales; se da una relación de objeto a objeto más allá de las matemáticas. Hay una función que convierte el dominio de la estructura A en la de B, y viceversa, al tiempo que se conservan las relaciones definidas en cada estructura. A y B tienen el mismo cardinal, y existe una relación entre las estructuras (*relational framework*) que resulta ser la misma. En general, dos estructuras isomórficas son similares, ya que comparten el *relational framework*, mientras que la similaridad o la semejanza no son reducibles al isomorfismo.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

A continuación, Suárez (*ibid.*, pp. 229-230) hace una distinción entre los modos de representación (*means of representation*) y los constituyentes de la representación (*constituents of representation*):

At any time, the relational R between A and B is the *means* of the representation of B by A if and only if, at that time, R is actively considered in an inquiry into the properties of B by reasoning about A⁹⁹.

The relation R between A and B is the constituent of the representation of B by A if and only if its obtaining is necessary and sufficient for this representation.

Hechas estas salvedades, Suárez (*ibid.*, pp. 230-237) critica las pretensiones del isomorfismo y la similaridad mediante cinco argumentos:

1) *Ni la relación de similaridad, ni la de isomorfismo, se aplican a todos los casos de representación.*

Para el caso del modelo de puente, aunque haya parecidos entre el puente real y el modelo a escala, hay importantes desavenencias, como el tamaño. La similaridad sería una guía para determinar los aspectos semejantes y desemejantes. El isomorfismo, en cambio, no se aplicaría directamente a los dos objetos físicos, sino a sus estructuras abstractas, como la forma geométrica. En todo caso, si tuviéramos dos modelos a escala de un mismo puente, serían dos modos de representación distintos, mientras que el isomorfismo diría que son exactamente los mismos.

Para el plano o gráfico del puente, el isomorfismo funciona mejor que con la similaridad, que sólo destaca las proporciones y la forma geométrica. Este es un típico caso donde el isomorfismo se convierte en un modo de la representación científica.

Para el modelo de bolas de billar, no hay en principio ningún rasgo similar que el modelo comparta con la naturaleza. El isomorfismo sólo trata de las relaciones abstrac-

⁹⁹ El isomorfismo y la similaridad serían sólo dos modos de representación. Pero la ciencia también trabaja con las ejemplificaciones, la convención, o la verdad. Para averiguar propiedades de B a través de las propiedades de A, la ciencia puede no hacer ningún tipo de referencia al isomorfismo o a la similaridad entre ambas estructuras. Más aún, según Suárez, utilizar un modo de representación particular no significa que ese modo constituya lo esencial de la representación de B por parte de A.

IV. MODELOS ESTRUCTURALISTAS

tas ejemplificadas en la dinámica de los sistemas, pero no dice nada acerca de las estructuras de los objetos individuales.

Para la ecuación cuántica de estado, no hay aspectos relevantes entre la ecuación y el sistema que sean similares. Respecto al isomorfismo, resulta trivial que las estructuras dinámicas del fenómeno y de la ecuación diferencial son isomórficas. Pero Suárez señala que los científicos rara vez investigan las propiedades formales de estas estructuras; más bien buscan soluciones para la ecuación a partir de condiciones de contorno, y comprueban qué parámetros de las soluciones se corresponden con las observaciones.

2) Ni la relación de similaridad, ni la de isomorfismo, poseen las propiedades lógicas de la representación.

La representación suele añadir y quitar algo al objeto, por lo que la fuente y el objetivo no son idénticos. La representación no es simétrica (la fuente no tiene por qué ser representada por el objetivo), ni reflexiva (ni la fuente ni el objetivo se representan a sí mismos), ni transitiva (que A represente a B, y B represente a C, no tiene por qué significar que A represente a C). Sin embargo, la similaridad es reflexiva (una cosa es similar a sí misma) y simétrica (si A y B son similares, comparten propiedades mutuamente), mientras que la relación de isomorfismo es reflexiva (una estructura abstracta es isomórfica consigo mismo), simétrica (Si A es isomórfico a B, B es isomórfico a A) y transitiva (si el isomorfismo vale para A y B, y para B y C, A y C son isomórficas). Las teorías de la representación basadas en estas relaciones no hacen justicia, según Suárez, a estos rasgos fenomenológicos.

3) Las relaciones de similaridad e isomorfismo no dan cuenta de fenómenos tan frecuentes como el “mistargetting” respecto del objeto modelado y la inexactitud.

La representación acerca de un objeto puede estar equivocada, y muchas veces suponemos que A representa a B cuando en realidad representa otra cosa. Un matemático puede resolver, a partir de ciertas condiciones de contorno, una ecuación de estado cuántica y creer que corresponde a una partícula clásica con movimiento browniano. La intencionalidad del agente es olvidada en las relaciones de isomorfismo y similaridad. No tener en cuenta este factor fundamental significaría, por ejemplo, que Riemann fuera

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

el creador de la estructura espacio-temporal de la Relatividad, únicamente por el hecho de haber adelantado la estructura matemática antes que Einstein.

Por otra parte, las representaciones de los fenómenos tienen una exactitud que puede variar gradualmente respecto a distintos aspectos de los objetos modelados. La similitud puede explicar la relativa falta de adecuación a los fenómenos de ciertas idealizaciones de la Física; sin embargo, señala Suárez, la exactitud es una cuestión numérica, y no cualitativa: por ejemplo, en los modelos de Mecánica Clásica, respecto a la Teoría de la Relatividad. Lo interesante, en cualquier caso, es ver hasta qué punto se aproximan nuestras predicciones a las observaciones.

4) Las relaciones de similaridad e isomorfismo no son necesarias para la representación.

Las relaciones de representación se pueden llevar a cabo sin el concurso de la similaridad o el isomorfismo. Una ecuación puede representar un fenómeno sin que tenga que parecerse a él, o ser isomórfico. Un modelo de Newton puede representar el sistema solar, sin ser isomórfico a él, e incluso siendo empíricamente inadecuado. Respecto de la similaridad, puede alegarse que todo, en principio, se parece a todo, y que el hecho de que A represente a B indica que se parece en algunos aspectos. Pero la cuestión decisiva es especificar cuáles son esos aspectos relevantes; es decir, hay que dar un criterio que ligue necesariamente la relevancia a la representación. Además, hay similaridades que no proporcionan ninguna guía para la investigación científica.

5) Las relaciones de similaridad e isomorfismo no son suficientes para la representación.

Tanto la similaridad como el isomorfismo pasan por alto, según Suárez, el componente esencial de la representación: la *intencionalidad*. Tiene que haber una relación en la representación de manera que la fuente nos conduzca hasta el objetivo, tal como un investigador llega hasta el objeto que modela a partir de consideraciones acerca de la fuente. Tiene que haber una intención para, por ejemplo, convertir un espacio fase en el movimiento real de una partícula. Una ecuación diferencial, como en el caso de una ecuación de difusión cuántica, no representa por sí sola, apelando al isomorfismo, el

IV. MODELOS ESTRUCTURALISTAS

movimiento de una partícula. A lo sumo, representa el movimiento de un vector en el espacio de Hilbert, por lo que resulta una representación de una representación, y no la representación de la realidad¹⁰⁰.

En suma, para Suárez, el isomorfismo y la similaridad son *modos de representación*, pero no *constituyentes* de la representación científica.

Coincido con Suárez en que ni el isomorfismo ni la similaridad son constituyentes de la representación científica; pero mi enfoque será un tanto diferente, puesto que considero que *ni siquiera constituyen modos válidos de representación*. En lo que resta del capítulo, me dedicaré a criticar la noción de isomorfismo, mientras que dejo para el siguiente (Cap. V, “El papel de las analogías en Física”) mi primera crítica de la similaridad. Comenzaré mi argumentación en contra de las premisas estructuralistas exponiendo la definición precisa de isomorfismo dentro de la Matemática, donde la palabra tiene un significado y un uso *reales*:

Un isomorfismo es un *homomorfismo biyectivo*¹⁰¹.

Dadas dos estructuras algebraicas $(X; *)$ e $(Y; \circ)$, la aplicación $f: X \rightarrow Y$ es un homomorfismo si $f(x_1 * x_2) = f(x_1) \circ f(x_2)$ para todo x_1, x_2 .

A su vez, una estructura algebraica es un conjunto X que tiene una o varias operaciones $*$, \circ , ... La operación no es más que una aplicación $X \times X \rightarrow X$, $(x, y) \mapsto x * y$.

De entrada, ya resulta sorprendente el hecho de que la naturaleza, o la realidad, pueda ser considerada una “estructura algebraica”, con sus elementos y sus operaciones definidas, y con independencia de la estructura de nuestra representación. Pero sigamos con un ejemplo tomado del Álgebra, donde el subcuerpo racional de todo cuerpo ordenado es isomorfo al cuerpo racional \mathbb{Q} .

¹⁰⁰ La capacidad de A para conducir a un investigador competente y bien informado hacia el objetivo B es lo que Suárez llama la fuerza representacional (*representational force*) de A, y lo que considera requisito imprescindible para una teoría satisfactoria de la representación, que tiene que considerar el aspecto intencional del agente. Véase Suárez (*ibid.*, pp. 237 y ss.).

¹⁰¹ Cf. Burgos, 1984, p. 399.

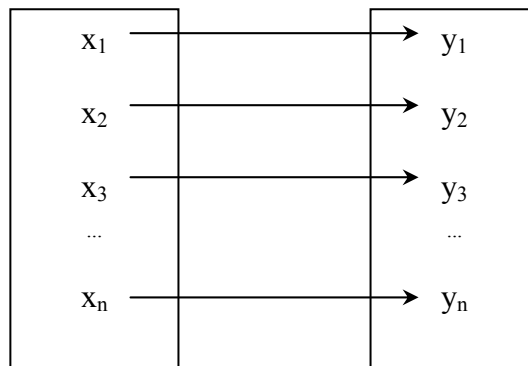
MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Sea $(K; +, \cdot, \leq)$ un cuerpo ordenado. El menor de sus subcuerpos sería el siguiente subcuerpo racional de K :

$$\mathbb{Q}_K = \{mu / un \mid m, n \in \mathbb{Z}, n \neq 0\} \text{ (} u = \text{unidad de } K\text{)}$$

La aplicación $\mathbb{Q} \rightarrow \mathbb{Q}_K, m/n \mapsto mu / un$ es biyectiva, lineal para la suma y conserva el orden. Aquí se da un isomorfismo entre cuerpos y conjuntos ordenados: el cuerpo de los números racionales \mathbb{Q} resulta ser identificable con \mathbb{Q}_K .

Para que dos estructuras sean isomórficas tiene que haber una aplicación biyectiva entre ellas. Es decir, que la aplicación tiene que ser exhaustiva e inyectiva, de elemento a elemento. Los conjuntos tienen que ser equipotentes, tienen que tener el mismo cardinal: *el mismo número de elementos*. Y no sólo eso: tienen que darse dos operaciones, una en el conjunto inicial y otra en el conjunto final, tal que la aplicación de la operación₁ entre dos elementos de la primera estructura sea igual a la operación entre las imágenes respectivas de aquellos elementos:



$$f(x_1 * x_2) = f(x_1) \circ f(x_2) = y_1 \circ y_2$$

Así definidas las estructuras, las operaciones y los isomorfismos, puede llegar a demostrarse, por ejemplo, que el conjunto de los números enteros, \mathbb{Z} , es numerable, es decir, que es posible establecer una biyección entre los números naturales y los números enteros, o incluso que no es posible ninguna biyección entre el intervalo de números reales $(0, 1)$ y los números naturales, como demostró Cantor.

IV. MODELOS ESTRUCTURALISTAS

Todas estas relaciones se dan entre estructuras algebraicas, entre conjuntos cuyos elementos y operaciones se definen perfectamente. La Teoría de Conjuntos, y el Álgebra, en general, avanzan muy despacio, cuidadosamente; antes de llegar a estos resultados, se definen cosas como “conjunto complementario”, “partición”, “estructura”, “producto cartesiano”, “relación de orden”, “relación de equivalencia”, “elementos comparables”, “retículo”, “correspondencia”, “dominio”, “imagen”, etc. Las relaciones de isomorfismo sólo tienen sentido en una serie de conjuntos matemáticos perfectamente definidos, caracterizados y estructurados. Son relaciones entre estructuras, sencillamente.

Si ahora el estructuralismo de Sneed, Stegmüller y Moulines nos dice que puede establecerse una biyección entre el modelo resultado de nuestra representación y la propia naturaleza, lo menos que podemos hacer es sentirnos escépticos respecto de tal posibilidad. Porque dejando de lado la dificultad de que en la naturaleza, por sí sola, puedan existir operaciones como el producto escalar, la suma, o la raíz cúbica, ¿cuál es el criterio que permite *discernir* los elementos básicos de la naturaleza? Es decir, si se supone que la realidad, con independencia de nuestra representación, tiene el carácter de estructura algebraica, lo primero que habrá que especificar será cuáles los elementos del conjunto imagen; entre otras cosas, para poder definir la estructura “extensionalmente”, como pretenden ellos.

Pero no hace falta una reflexión demasiado profunda para darse cuenta de que la naturaleza, en sí misma, no tiene definidos matemáticamente sus objetos, y que eso es algo que hacemos nosotros por medio de nuestra representación. Pretender que la naturaleza tiene una estructura algebraica antes de que nosotros resaltemos de ella lo que nos interesa es una cuestión bastante difícil de demostrar. Más aún, por muchas matemáticas, símbolos y relaciones formales que escribamos en el papel, ni la Matemática, ni el Álgebra, ni mucho menos la Teoría de Conjuntos, permiten semejante cosa. La razón es muy sencilla: no hay un conjunto imagen definido donde llevar las flechas desde el conjunto inicial. No lo hay, digo, antes de nuestra representación, que precisamente lo que hace es destacar de la naturaleza las propiedades, relaciones y objetos que nos interesan.

Sin embargo, se me puede reprochar que lo esencial de la representación científica es tratar de encontrar una representación que “encaje” o se “adecue” a un sistema *preexistente*. Pero yo no afirmo que la representación sea algo “subjetivo”, o relativo a nuestros esquemas psicológicos; simplemente digo que antes de que el fenómeno se

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

transforme en un sistema, en una cosa objetiva, es necesario *suponer* que la naturaleza es un sistema que funciona de acuerdo con ciertas reglas. Es decir, que *la realidad, por sí misma, no es un sistema a no ser que la ciencia se la represente como una estructura.*

Creo que esta no es una cuestión menor. En el debate entre realistas e instrumentalistas, muchas veces se olvida que los predicados científicos que aplicamos a la naturaleza son propiedades que nosotros mismos destacamos de las cosas. Igualdad, desigualdad, semejanza, son predicados lógicos que se aplican únicamente a esas propiedades, y no a las cosas mismas. Nuestra imagen científica representa un material preexistente, del que se destacan los aspectos que consideramos más fundamentales. Lo esencial de la representación es destacar, abstraer, distinguir; y después comparar, relacionar. *Pero esta representación no es una réplica de las cosas.*

Para que la ciencia se hiciera una copia exacta del mundo tanto lo representado como la representación tendrían que tener el mismo carácter, la misma naturaleza, una misma forma. Pero el mundo puede ser algo muy diferente de la imagen que yo me hago de él. Yo puedo hablar de igualdad entre imágenes, entre características fundamentales, entre propiedades. Pero no puedo establecer una relación de igualdad desde el mundo físico hasta el mundo de la representación: son cosas completamente diferentes, no son de la misma naturaleza. La identidad sólo tiene sentido entre representaciones, no entre objetos reales, ni mucho menos entre un objeto real y una representación. La correspondencia no está aquí definida, no tiene sentido hablar de ella. No tengo los elementos necesarios para establecer ninguna relación matemática entre la cosa y la representación. No hay ningún conjunto final que me permita decir que aquí se dan los mismos objetos que en mi representación y una relación inyectiva o suprayectiva entre ellos. No tengo ninguna justificación lógica para hacer tal cosa.

El propio concepto de estructura es sólo aplicable a objetos lógicos, nunca a la realidad misma. Yo no puedo disponer en dos ejes los objetos del mundo y los objetos matemáticos y efectuar el producto cartesiano para ver qué resulta. La naturaleza, en sí misma, no tiene una estructura de grupo, ni de anillo, ni de cuerpo; no es un espacio vectorial de tres, cuatro o treinta dimensiones; no es una supercuerda, ni una eigenfunción, ni una onda. El mundo no es la interpretación de ninguna estructura matemática porque no es posible, desde el punto de vista lógico, obtener semejante modelo. La naturaleza no es un ejemplo de ninguna teoría, ni es consistente, contradictoria, completa o

IV. MODELOS ESTRUCTURALISTAS

incompleta en sí misma. El mundo no es ningún modelo, no es un campo donde se ejemplifiquen nuestras construcciones.

Que yo pueda relacionar ciertas propiedades de la naturaleza usando un lenguaje matemático, no significa que la naturaleza esté escrita en lenguaje matemático. La cuestión de cómo accedemos a la naturaleza es diferente de cómo es la naturaleza en sí misma. Una cosa es decir que conozco la estructura física de un fenómeno y otra cosa es decir que el fenómeno es mi estructura realizada. El acceso a la realidad se produce de forma matemática una vez que conocemos lo que hay que destacar de la realidad. Todas las propiedades lógicas basadas en la igualdad son aplicables exclusivamente a construcciones nuestras. La ciencia abstrae de la realidad lo que considera que es su fundamento, pero no comparten una misma estructura porque la naturaleza, sencillamente, no se deja, en sí misma, definir como objeto, a no ser que la convierta en una representación, en cuyo caso ya no se puede hablar de un isomorfismo entre la representación y el mundo, sino entre representaciones.

Para copiar una cosa necesito que el original esté a mi alcance, que pueda verlo, tal y como, efectivamente, ocurre con la naturaleza, pero también necesito poder ver el original en su totalidad, de forma completa: si no, ¿cómo es posible que copie exactamente algo de lo que desconozco alguna de sus partes? En todo caso, tendría una copia exacta de eso que veo, pero incompleta. Mi copia estaría limitada a lo que yo percibo del original, a lo que se me muestra de él. Pero en tal caso yo no puedo conocer nunca el porcentaje de realidad que he copiado en mi representación, ya que faltaría saber dónde empieza y dónde acaba la cosa, cuáles son sus límites. Si la Física copia la naturaleza sólo podría ser hasta cierto punto, dentro de ciertos límites de percepción. En estos umbrales máximo y mínimo se podría hablar de que ha copiado un porcentaje relativo a esos límites, pero nunca de forma absoluta, puesto que la ciencia desconoce dónde empieza y dónde terminan los límites de la realidad, si es que los tiene¹⁰².

Todo esto no son divagaciones abstractas que no tengan un contenido real. En Física, un mismo fenómeno puede ser representado de diferentes maneras. En cada una de esas representaciones varían los objetos y las relaciones que se dan entre ellos. No hay un único sistema que sea “isomórfico” al fenómeno. La realidad puede ser esquematizada de distintas maneras: no hay por qué suponer que siempre tiene el mismo dominio de

¹⁰² La naturaleza, sencillamente, no se deja “copiar”.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

objetos, el mismo cardinal, y las mismas relaciones entre ellos: la naturaleza puede ser representada de muy distintas maneras; no hay una estructura algebraica que prevalezca por encima de las demás: eso depende de lo que queramos destacar del fenómeno.

Por ejemplo, sea el sistema S formado por tres muelles m_1, m_2, m_3 , que hacen fuerza sobre el cuerpo a (Figura 4.1). Dadas las fuerzas que los muelles ejercen sobre el cuerpo, nos interesa conocer el movimiento del cuerpo a .

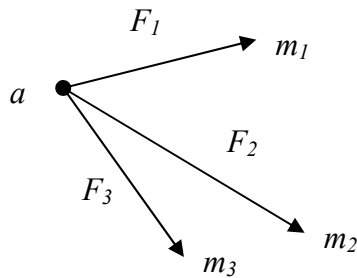


Figura 4.1

¿Cómo se formalizaría este sistema desde el punto de vista estructuralista? En primer lugar, especificando los elementos del conjunto, el dominio D , formado por los tres muelles y el cuerpo. A continuación, se especifican las relaciones R que se dan entre ellos; por ejemplo, la intensidad de las fuerzas y su dirección. Suponemos que no hay interacciones entre los tres muelles. En principio, el sistema S quedaría caracterizado de esta manera:

$$D = (m_1, m_2, m_3, a)$$

$$R = (a F_1 m_1, a F_2 m_2, a F_3 m_3)$$

Ahora bien, el sistema S es equivalente a otro sistema S' donde hay un solo muelle, m_R , que tira sobre el cuerpo con una fuerza F_R igual a la suma de las tres fuerzas F_1, F_2, F_3 . La razón es que se trata de un sistema de fuerzas concurrentes, y en lo que respecta al movimiento y traslación de a , ambos sistemas son exactamente equivalentes:



IV. MODELOS ESTRUCTURALISTAS

En este caso, el sistema S' , sería caracterizado, según el estructuralismo de la siguiente manera:

$$D = (a, m_R)$$

$$R = (a F_R m_R)$$

Como vemos, ha cambiado el cardinal del dominio D , el número de relaciones que se dan en R , y la naturaleza misma de las relaciones. Lo que para el estructuralismo son dos sistemas diferentes (ni siquiera es posible establecer una biyección entre ellos), para la Física son exactamente el mismo sistema. Hay dos representaciones equivalentes para un mismo sistema físico: ¿dónde está el “isomorfismo” entre el modelo y la realidad? ¿O es que un mismo fenómeno puede ser “isomórfico” a muchos modelos?

Porque no sólo se trata de que S y S' sean equivalentes: ¡hay infinitos sistemas S'' , S''' , ..., $S^{n...}$!, cada uno de ellos caracterizado por un número determinado de muelles, en diferentes posiciones, con diferentes fuerzas, tal que el sistema resultante, desde el punto de vista físico, es enteramente equivalente, si de lo que se trata es de calcular el movimiento de traslación y rotación del cuerpo a ! ¡Si hacemos caso al estructuralismo, la teoría se volvería loca adaptando sus estructuras a la realidad para formar modelos: no sabría a cuál dar preferencia!

Pero esta manera de proceder no se produce aisladamente dentro de la ciencia. En el cálculo vectorial, que constituye una de las disciplinas básicas de la Física, y uno de los medios de representación más utilizados, lo primero que el estudiante aprende es a reducir ciertos sistemas de vectores a otros más básicos, de manera que resulten totalmente equivalentes a efectos físicos, y representen un *mismo* fenómeno. Dado que las dos magnitudes básicas que caracterizan a un sistema vectorial son la resultante y el momento resultante, dos sistemas serán equivalentes cuando tengan la misma resultante y el mismo momento resultante para todo punto del espacio. Así, la reducción más básica consiste en sustituir cualquier sistema de vectores por otro donde la resultante y el momento resultante se consideren aplicados en un solo punto, el centro de reducción. Un sistema de vectores concurrentes, como en el ejemplo anterior, es equivalente a otro donde la resultante está colocada en el eje central, es decir, en el lugar geométrico de los puntos donde el momento resultante es paralelo a la resultante general y resulta, por lo tanto, mínimo. Para un sistema de vectores paralelos, cuya resultante sea distinta de

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

ceros, hay otro sistema equivalente donde la resultante se sitúa en el centro de vectores paralelos, un punto donde el momento resultante del sistema coincide con el momento de la resultante, y cuyas coordenadas pueden calcularse analíticamente a partir de los vectores iniciales.

Los sistemas de vectores, que pueden representar todo tipo de magnitudes físicas, como fuerzas, velocidades, rotaciones, traslaciones, etc., se clasifican según su resultante y según su momento resultante, sin que en ningún momento se haga referencia a los elementos de la realidad, al cardinal del conjunto o al número de vectores, ya que esto puede variar de acuerdo con la naturaleza del problema que se estudia, y según los datos iniciales de que se dispongan. La conveniencia, el aspecto práctico del asunto, es lo que decide si un sistema complejo de resultante nula, por ejemplo, se reduce a un par de vectores, o si, en general, conviene reducir un determinado sistema a tres vectores aplicados en tres puntos arbitrarios. Todo esto se puede conseguir: la representación del fenómeno sería idéntica, pero desde el punto de vista estructuralista todo habría cambiado.

Consideremos otro ejemplo, que aparece en Alonso y Finn (1986, p. 250). Sea un sistema S formado por dos cuerpos con masas que se acercan con velocidades v_1 y v_2 hasta que chocan. Después de la colisión, las dos masas siguen trayectorias independientes, tal como se muestra en la *Figura 4.2*:

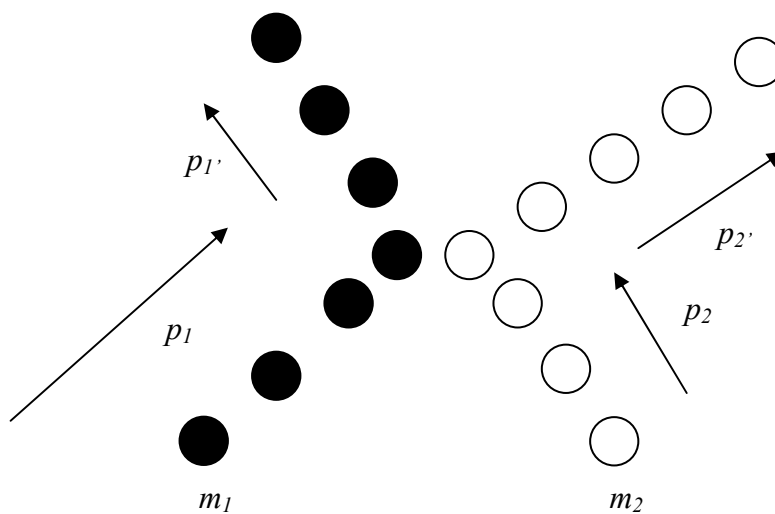


Figura 4.2

IV. MODELOS ESTRUCTURALISTAS

El dominio D estaría formado por las *dos* partículas, mientras que cabe presumir que las relaciones entre ellas harían referencia a la conservación de la cantidad de movimiento:

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_1' + \vec{p}_2'$$

Se supone que este sistema, S , es isomórfico a la realidad. Se da una biyección entre elementos, y la aplicación transforma las operaciones de nuestra estructura en las operaciones que tienen lugar en la realidad. Ahora bien, como muestra la *Figura 4.3*, S se puede sustituir por otro sistema, S' , donde sólo exista un cuerpo situado en el centro de masas, de velocidad $v_{CM} = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$, y cuya masa sea igual a la masa reducida,

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}.$$

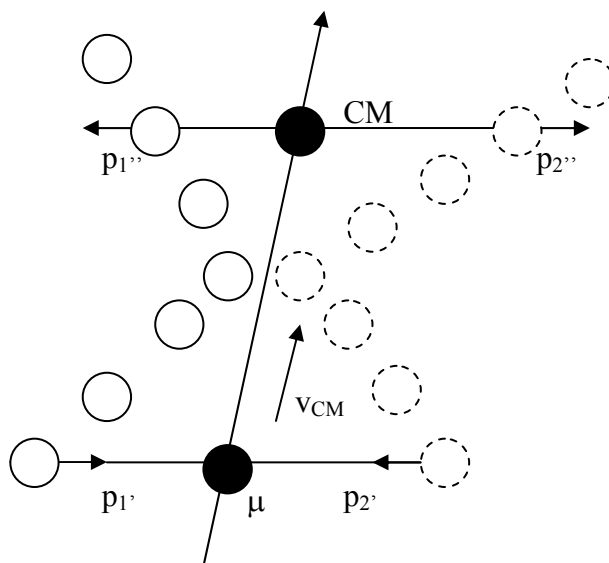


Figura 4.3

De nuevo nos encontramos con el mismo fenómeno representado de maneras distintas, según el estructuralismo, pero que obedece a una misma realidad, según la Física. ¿Cuál de los sistemas, S o S' , es el isomórfico con la realidad?

En general, para el caso de dos cuerpos aislados que interactúan entre sí, siempre es posible encontrar un sistema equivalente de un cuerpo de masa igual a la masa redu-

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

cida sobre el que actúa una fuerza igual a la de la interacción mutua. Esto es válido especialmente para uno de los ejemplos estrellas del estructuralismo, la interacción entre planetas, donde se supone que es más o menos “válida” la Mecánica Clásica. Alonso y Finn señalan (*op. cit.*, p. 248-249):

Por ejemplo, podemos reducir el movimiento de la luna relativo a la tierra a un problema de una única partícula usando la ecuación reducida del sistema luna-tierra y una fuerza igual a la atracción de la tierra sobre la luna. Análogamente, cuando hablamos del movimiento de un electrón alrededor del núcleo, podemos suponer el sistema reducido a una partícula con masa igual a la masa reducida del sistema electrón-núcleo moviéndose bajo la fuerza entre el electrón y el núcleo.

Llegados a este punto, se podría alegar que, de los dos sistemas implicados en cada caso, uno es el fundamental, el isomórfico, mientras que el otro es una ficción matemática que resulta del análisis del primero. Pero eso es un *juicio de valor* que decide lo que es real y lo que es ficticio desde fuera de la Física, no dentro de su lenguaje. Lo “real”, lo “más fundamental”, son predicados que no tienen cabida en Física, cuando de lo único que se trata es de calcular ciertas cantidades con ayuda de sistemas alternativos. Igual peso “real” tienen uno como otro, porque resultan totalmente equivalentes; ninguno es “más verdadero”. Preguntarse cuál fue primero puede tener, a lo sumo, cierto valor histórico, o heurístico, a la hora de reducir otros sistemas; pero desde el punto de vista físico, ninguno está más justificado que otro. *Son la misma cosa, pero sistematizada de forma distinta.*

Otra objeción a mi crítica podría ser que sistemas alternativos se complementan entre sí: al final, como lo único que cuenta son las ecuaciones, cada sistema posibilita obtener ciertas ecuaciones, que en conjunto ayudan a la resolución de un problema concreto. En el ejemplo de la *Fig. 4.3*, si el origen del sistema de referencia se hace coincidir con el centro de masas de los dos cuerpos, un observador situado en ese origen vería moverse a los dos cuerpos con la misma cantidad de movimiento, pero en sentido opuesto (en la figura p_1 , p_1' , p_2 , y p_2' , simbolizan la cantidad de movimiento). El caso tiene mucha importancia práctica, porque permite referir las medidas de las velocidades de los cuerpos efectuadas en un sistema fijo de un laboratorio al sistema de referencia del centro de masa, con lo que los cálculos se simplifican enormemente. Este es uno de los métodos fundamentales para estudiar los fenómenos de dispersión en Física Nuclear. Los sistemas, efectivamente, se *complementan* entre sí.

IV. MODELOS ESTRUCTURALISTAS

Pero donde tal vez se vea mejor todo esto es en los circuitos electrónicos. Sea el circuito de la *Figura 4.4*. Hay una admitancia Y entre los nodos 1 y 2, que a su vez pueden conectarse a otros nodos con diferentes componentes, lo que se representa con un aspa de líneas quebradas. Para simplificar los cálculos en el análisis de los circuitos, queremos sustituir la impedancia Y por dos admitancias Y_1 e Y_2 , que se sitúen entre los nodos 1 y 2 y la tierra, como se indica en la *Figura 4.5*.¹⁰³

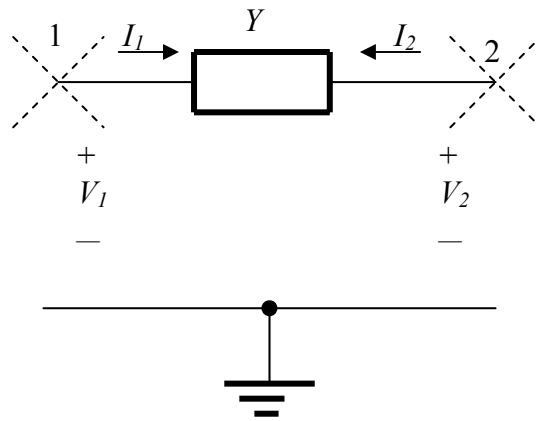


Figura 4.4

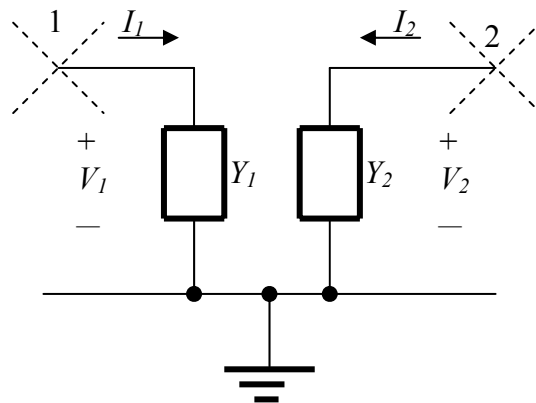


Figura 4.5

Las ecuaciones que ligan Y_1 e Y_2 con Y son las condiciones necesarias y suficientes para que exista tal equivalencia y ambos sistemas sean sustituibles. Si se conoce la relación entre los voltajes V_1 y V_2 , y se simboliza con la letra K , entonces:

¹⁰³ Cf. Sedra y Smith (1989, p. 43).

$$Y_1 = Y(1 - K)$$

$$Y_2 = Y(1 - 1/K)$$

Este resultado es el llamado Teorema de Miller, de *innumerables* aplicaciones en dispositivos electrónicos y señales de amplificación. Pero hay otros teoremas, como de Norton, o el de Thévenin, que permiten también la sustitución, el reemplazo o la reducción de unos sistemas a otros. Toda la teoría de Circuitos, Dispositivos, Señales, y Control de Sistemas se basa en la posibilidad de sustitución de unos sistemas por otros, que simplifican los cálculos a partir de una serie de condiciones o datos iniciales.

La utilización conjunta de estos sistemas permite una mayor capacidad resolutive. Se puede “saltar” de un sistema a otro, y volver siempre al sistema original, si los datos que nos interesan están incluidos y se resuelven allí. Pero “sistema original” no significa “el sistema real por antonomasia”: significa un sistema de ecuaciones donde al final se despeja la incógnita que se buscaba, ni más ni menos. Lo “original” depende de la situación, del problema. No es una cuestión resuelta, ni absoluta; es relativa al fin que se pretende.

Así que la utilización conjunta de sistemas alternativos para representar un mismo fenómeno, no afecta a la línea principal de mi crítica, que dice simplemente que la representación, ni es única, ni es isomórfica. En todo caso, indica los límites del estructuralismo, que no es capaz de explicar este tipo de equivalencias, y que, dentro de su aparatoso formalismo, ni siquiera es capaz de indicar cosas tan elementales como cuál es el sistema de referencia, dónde se sitúa el observador, o qué tipo de coordenadas (cartesianas, cilíndricas o esféricas) se van a utilizar.

Creo que ha quedado claro lo que quería decir. Sólo quiero indicar dos apuntes que considero necesarios:

1) La relación de equivalencia entre dos sistemas, S_i, S_j , simbolizada por $S_i \equiv S_j$, es una relación reflexiva, simétrica y transitiva, igual que para el isomorfismo. Pero la relación, obviamente, se da entre sistemas, entre representaciones, como no podía ser de otra manera, y no entre la realidad y el “mundo”.

IV. MODELOS ESTRUCTURALISTAS

2) A diferencia de otras ocasiones dentro de la Física, donde las simplificaciones conllevan un error, aquí se produce una exacta equivalencia entre modelos. Es decir, que para resolver un problema no siempre es necesario hacer suposiciones más o menos “falsas”, como considerar que la Tierra es esférica, o despreciar las fuerzas de Coulomb a favor de otras interacciones en el núcleo. Un problema puede solucionarse simplemente cambiando el sistema de referencia.

En suma, las representaciones alternativas equivalentes son distintas formas de ordenar la información del fenómeno. En esencia, designan la misma cosa. Lo que afirmo es que esa equivalencia no puede ser reflejada “extensionalmente”. Dentro de la ciencia hay métodos suficientes de aproximación a los fenómenos, que no requieren de la ayuda del isomorfismo. El cálculo vectorial, por ejemplo, se basta por sí solo para fundamentar los cambios operados en el sistema cuando se cambia de ejes, sistemas de referencias y coordenadas, y no requiere la intervención *a posteriori* de la Teoría de Conjuntos, o de cualquier otro tipo de axiomatización, por muy “informal” que sea.

Por eso, hablando de la relación entre representación y realidad, yo prefiero hablar de *síntesis*. Los modelos sintetizan la información, reproducen esquemáticamente lo que se conoce de un fenómeno. Pero una síntesis puede ser obtenidas de distintas maneras, y representada igualmente de distintas formas. La síntesis hace referencia a la información física disponible, y no se pronuncia respecto de la ontología del universo, sino que admite distintas posibilidades de esquematización, de acuerdo con el fin propuesto y con el caso (problema) particular. Una síntesis no se define extensionalmente, no indica los campos de la realidad donde una teoría es verdadera. La síntesis es un conjunto de ecuaciones más una serie de condiciones iniciales, entre las que incluyo los enunciados de observación. *Eso es un modelo, un modo de sintetizar el comportamiento del fenómeno, un modo de decir lo que se conoce de él: pero, desde luego, eso no supone pensar que haya sólo una estructura que lo describe.*

El problema básico que tiene el estructuralismo está en considerar que los objetos de la naturaleza están dados, y son perfectamente distinguibles. En vez de considerar directamente una serie de propiedades físicas potencialmente esquematizables en distintos modelos, se empeña en resaltar de la naturaleza una serie de objetos que desde del punto de vista físico son sustituibles perfectamente unos por otros. Cuando el protón, la Luna, o cualquier otro objeto considerados “reales” son representados, esos objetos pa-

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

san a convertirse en un sustrato lógico dotado de ciertas propiedades. Se han convertido en nombres lógicos que resumen ciertas cantidades físicas. Para que se me entienda, y por hablar en lenguaje metafísico clásico: los objetos se han transformado en sustratos y han dejado de ser sustancias. La representación ha transformado lo que era un objeto real en partes de un sistema más amplio; son subsistemas, modelos, y como tales, pueden ser sustituidos por otros que preserven la equivalencia física del sistema general.

Los fenómenos pueden caracterizarse de muchas maneras, dependiendo de lo que nos interese calcular. En cada una de estas caracterizaciones, la realidad física del fenómeno puede definirse atendiendo a distintos objetos, a distintos cardinales, a distintas relaciones. Cuál de estos sistemas sea el “verdadero”, el “isomórfico”, es algo que no tiene sentido dentro del lenguaje de la Física, donde son perfectamente equivalentes. Puede resultar mucho más útil reducir un sistema complejo, donde apenas puede realizarse algún cálculo, a otro más sencillo donde las ecuaciones se simplifican. *Tendríamos distintas representaciones, pero una misma síntesis.*

Porque uno de los errores básicos, no ya del estructuralismo, sino de las concepciones semánticas o de todas aquellas que traten de definir “extensionalmente” la realidad, es considerar que la teoría se pronuncia acerca de la realidad de los objetos, y que discrimina el mundo en una serie de elementos de los que luego especifica las relaciones que guardan entre ellos. Pero la teoría no es ni más ni menos que una serie de ecuaciones, y, desde luego, una ecuación no señala, no designa, no se compromete con la realidad de los objetos. Se limita a relacionar propiedades, una vez que estos objetos han sido constituidos, caracterizados y definidos en la representación, en el modelo. No hay objetos característicos de una teoría, no hay ontologías distintas entre diferentes teorías. Lo único que hacen es pronunciarse acerca de las relaciones que se dan entre dimensiones: eso es una ley. Pero una ley no se preocupa de caracterizar antes los objetos. Eso es algo que se realiza independientemente, con anterioridad, en la representación previa. *El mundo, por sí solo, no tiene discriminados (matemáticamente) sus objetos.*

4.3. Relativismo e inconmensurabilidad

Voy a dar un giro a continuación, acercándome al problema tratado desde la filosofía evolucionista. Por mi parte, creo que la crítica que he realizado al isomorfismo me aleja

IV. MODELOS ESTRUCTURALISTAS

considerablemente del realismo científico, si éste se entiende tal como lo describe acertadamente Munévar (2003, p. 48):

El realismo implica varios presupuestos metafísicos y epistemológicos, a saber: (1) las “cosas” (el universo) están “ahí”, lo cual es un buen presupuesto, y (2) están “ahí” de una y una sola manera (la estructura de la realidad).

Yo también creo que las cosas están “ahí”, pero que no hay una única manera de estructurarlas. Munévar (*op. cit.*, p. 58) añade que

Diferentes historias de interacciones (en la formación del mecanismo o aparato perceptivo de la especie) pueden conducir a diferentes formas de percibir la naturaleza.

Es decir, que no hace falta acudir a razones antropológicas, políticas, culturales o sociológicas para darse cuenta de que el mundo puede ser discriminado de maneras distintas, y que la representación puede variar de acuerdo a nuestros intereses.

Las experiencias particulares de un organismo dependen de su estimulación y de su mecanismo visual¹⁰⁴.

Por todo lo cual, concluye (*ibid.*, p. 63):

Es irónico que el realismo falle no por problemas conceptuales sino empíricos.

El realismo, entendido como la defensa de una única estructura isomórfica con la realidad, falla. Los problemas son, efectivamente, empíricos: el realismo no es capaz de interpretar correctamente los textos científicos. En la propia Física, la realidad es representable de distintas maneras. El relativismo de Munévar (2002, p. 531) admite la posibilidad de que haya más de un punto de vista válido, aunque no todos tengan que serlo. Su relativismo está fundado en los resultados de la Biología, de la Teoría de la Evolución y de la Neuropsicología. No hay una simple verdad, puesto que la propia noción de verdad se fundamenta en nuestros esquemas cognitivos. Pero eso no significa que los esquemas o la propia realidad no puedan cambiar.

¹⁰⁴ *Ibid.*, p. 59.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

The environment is not static, however: it may simply change, in which case the phenotypes that may have been adequate before may be challenged successfully by a new approach more in consonance with the new circumstances. The relevant environment may also change as the result of the interaction with the first successful phenotype¹⁰⁵.

Hasta aquí, estoy de acuerdo en lo expresado por Munévar. Sin embargo, apelando a lo que él llama el “Principio de Relatividad de la Percepción”, afirma (cf. 2003, p. 62) que “las otras especies también tienen el mismo derecho a afirmar que ellas son las que ven las cosas como realmente son” y se refiere (*ibid.*, p. 69) a la “posibilidad de muchos sistemas distintos, o distintos linajes de sistemas, todos igualmente “buenos” a su manera, cuyas “metas” podrían ser lenguajes de observación radicalmente distintos”. Dado que existen muchas maneras y métodos de interactuar con la naturaleza, incluso si admitimos una única faceta del mundo, puede haber (cf. *ibid.*, p. 65) muchos tipos de hechos donde creíamos que sólo existía uno. Así, explícitamente, afirma (*ibid.*, p. 71, nota):

Los lenguajes de observación deben estar cargados de teoría (o ser sencillamente teóricos, como argumenta Feyerabend).

Obviamente, se refiere a la imposibilidad de distinguir entre términos teóricos y observacionales, idea que comparto plenamente. No obstante, creo que su intención es contraria a la mía: admitir la carga teórica de la observación, más aún, considerar que esta carga es completamente necesaria para el progreso científico (¿de qué otra manera la ciencia iba a ser capaz de observar más allá de las medidas que ya dispone?), no significa creer que la *referencia* de los términos cambie de una teoría para otra. Lo que cambia es la *relación* que las magnitudes mantienen entre sí, relación que se ve precisada por las nuevas ecuaciones, pero lo que nunca puede cambiar es la *experiencia* de esa dimensión.

Así, lo que yo pretendo es reducir el lenguaje de los hechos a un lenguaje fisicalista puro, es decir, que obedezca a los términos fundamentales de la Física, y que, cualesquiera que sean los aparatos cognitivos en juego, lo único que tienen que hacer es medir

¹⁰⁵ Cf. Munévar (1998, pp. 18-19).

IV. MODELOS ESTRUCTURALISTAS

esas propiedades, indicando, por supuesto, las condiciones y posición en las que se sitúa el observador. Pero Munévar, seguramente, pensaría que estas cantidades no son objetivas, válidas para cualquier punto de referencia, y que los términos obedecen al contexto dentro del que se encuadran: los términos son teóricos porque forman parte de una teoría; solamente allí tienen sentido. ¿Las teorías, por lo tanto, no son comparables?

Esta tesis de la *incommensurabilidad* fue desarrollada al mismo tiempo por Kuhn y Feyerabend en 1962; con ella pretendían mostrar el cambio de significado que algunos conceptos fundamentales de una teoría experimentan en el contexto de otra. Así, “fuerza”, o “masa”, tienen significados diferentes según la teoría donde aparezcan, por lo cual es “imposible definir todos los términos de una teoría en el vocabulario de la otra” (Kuhn, 1995, p. 96). Con ello se afirmaba que no hay un lenguaje común a partir del cual puedan ser evaluadas las teorías en condiciones de igualdad, y que cualquier tipo de traducción no puede ser completamente fiel. En Kuhn (*op. cit.*, p. 116) se dice:

Al formalizar la mecánica se puede seleccionar “masa” o “fuerza” como término primitivo y luego introducir el otro como término definido. Pero esta formalización no proporciona ninguna información acerca de cómo los términos primitivos o definidos se relacionan con la naturaleza, o cómo se identifican fuerzas y masas en situaciones físicas reales. Por ejemplo, si bien “fuerza” puede ser primitivo en alguna formalización particular de la mecánica, no se puede aprender a reconocer fuerzas sin aprender simultáneamente a identificar masas y sin recurrir a la segunda ley. Esta es la razón de que la “fuerza” y “masa” newtonianas no sean traducibles al lenguaje de una teoría física (aristotélica o einsteniana, por ejemplo) que no utiliza la versión de Newton de la segunda ley. Para aprender cualquiera de estos tres modos de hacer mecánica, los términos interrelacionados en alguna parte local de la red del lenguaje deben aprenderse o reaprenderse simultáneamente, y aplicarse luego a la naturaleza como un todo. No es posible simplemente transmitirlos individualmente mediante una traducción.

Feyerabend (1981), por su parte, argumenta contra Nagel y los “empiristas radicales” que no existe un lenguaje de observación neutral que permita comparar teorías inconsistentes entre sí, ya que los hechos no son independientes de la teoría de la que forman parte, y los predicados de descripción o predicción están insertos en el contexto global teórico del que proceden. Junto a Hanson (1977), afirma que los enunciados de observación están *cargados teóricamente*, por lo que no existen informes observacionales puros. Las teorías científicas son un todo significativo, de las que no es posible separar, en principio, sus componentes; la teoría dirige la experiencia, e interpreta los datos

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

experimentales de acuerdo a su propia concepción del mundo. Creo que esto es lo que defendería Munévar.

Las palabras no significan nada aisladamente, sino dentro de un lenguaje más amplio que las dota de sentido. Cuando se habla de incorporación de teorías, incluso en los casos menos problemáticos, como en la reducción de la teoría de Galileo sobre la caída libre de los cuerpos al sistema de Newton, se están traduciendo principios inconsistentes entre sí: la aceleración de la gravedad, en Galileo, es constante, mientras que desde Newton varía según la distancia al centro de la Tierra. De igual forma, la “masa”, en Teoría de Relatividad, es una relación, mientras que en Mecánica Clásica es una propiedad de los cuerpos. No es posible derivar una teoría de otra, puesto que se refieren a cosas diferentes, aunque parezca que hablan de lo mismo¹⁰⁶. Por lo tanto, la tesis de invariancia de significado, para Feyerabend, es completamente insostenible. Además, anularía el progreso científico, pues no permitiría que teorías que partan de principios excluyentes puedan sobrevivir al mismo tiempo, eliminando el pluralismo teórico necesario para un saludable crecimiento científico¹⁰⁷.

Tanto Kuhn como Feyerabend pretendían oponerse a la determinación de los llamados “límites matemáticos” entre teorías. Sin embargo, considero que no hace falta suponer ningún cambio esencial en el significado de las propiedades o relaciones físicas de los cuerpos para descartar de raíz estos “límites matemáticos”, que no son más que aproximaciones hechas a sabiendas del error fundamental que se comete¹⁰⁸.

Para ellos, después de derivar la Mecánica Clásica de la Teoría de la Relatividad o de la Teoría Cuántica, las ecuaciones que quedan no expresan lo mismo: se refieren a cosas diferentes. *Justamente, es lo contrario de lo que ocurre: ahora es cuando sí se refieren a lo mismo*. Porque el significado de las propiedades y relaciones empíricas, se refieren en último término a una sensación, a una medida, y pueden experimentarse operacionalmente. Una ecuación como:

$$LI' + RI + \frac{1}{C} \int_0^t IdS = E(t),$$

¹⁰⁶ Feyerabend, *op. cit.* p. 269.

¹⁰⁷ *Ibid.*, p. 29.

¹⁰⁸ Me remito al Cap. VIII, § 8.3

IV. MODELOS ESTRUCTURALISTAS

que representa un circuito alimentado por una fuerza electromotriz $E(t)$ dependiente del tiempo, con un condensador de capacidad C , una resistencia R y una bobina de autoinducción L , se refiere siempre a las mismas propiedades, ya sea en Teoría de Relatividad, Mecánica Cuántica, o Mecánica Clásica. Otra cosa es que varíe el rango de valores permitidos del sistema, o la forma en que estos conceptos se relacionan a su vez en otros lugares de la teoría; aquí, efectivamente, pueden darse modificaciones más o menos radicales, que afecten a la manera que tienen esas cantidades de relacionarse y depender entre sí. Pero por eso son teorías diferentes, porque relacionan de distinta manera los conceptos, y porque lo que en una teoría está permitido puede no estarlo en otra.

Admitir esto, que las teorías parten de distintos principios formativos de los modelos, de leyes incompatibles entre sí; admitir, en suma, la *incompatibilidad*, no significa admitir que exista ninguna “inconmensurabilidad” entre las teorías¹⁰⁹. Porque lo que no cambia, justamente, es la manera en que estos conceptos se refieren a la realidad a través de una sensación, y de una medida de la intensidad de esa sensación.

Porque la presión, el calor, la longitud, el tiempo, la velocidad, son conceptos empíricos que al menos desde tiempos de Aristóteles, si no antes, han venido utilizándose no ya con sentido parecido, sino *absolutamente idéntico*. De hecho, es lo único que no cambia en Historia de la Ciencia: los términos estrictamente físicos para los que se pretende, en las diferentes teorías, proporcionar una ecuación que los ligue, una regla que permita obtener unas cantidades en función de otras para poder así predecir los valores según el problema en cuestión.

Históricamente, se ha podido discutir si una propiedad es más importante que otra, o si hay una serie de propiedades físicas a partir de las cuales se obtienen las demás por derivación, o si hay una combinación algebraica de propiedades que resulta mucho más cómoda a la hora de efectuar los cálculos; pero lo que nunca se ha hecho, hasta la Filosofía del siglo XX, ha sido considerar que, cuando dos científicos hablan de una misma propiedad física, aunque conserven la homofonía, se están refiriendo en realidad a dos cosas diferentes.

La historia se remonta hasta el positivismo lógico, a la diferencia entre el lenguaje fenoménico y el lenguaje fisicalista. Cuando Bridgman (1927, pp. 5, 28) exige que los términos se definan operacionalmente dice una cosa muy sensata (aunque en realidad no

¹⁰⁹ Es lo que defiende Rivadulla (2004, pp. 130-132).

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

se definen los términos, sino las unidades); sin embargo, cuando dice [Bridgman, *op. cit.*, pp. 23-24] que diferentes medidas de una misma magnitud envuelven en realidad diferentes conceptos físicos, comete un error muy grave, y no tiene en cuenta el hecho de que puede haber muchas experiencias de un concepto físico, sin que resulten conceptos distintos.

Los términos físicos se experimentan. Su significado está dado por su referencia al mundo real, físico. Las ecuaciones describen lo que hace una serie de términos en función de otros, pero, estrictamente, no los definen; lo que la “fuerza”, la “masa”, la “temperatura”, sean en sí mismas, eso no puede definirse mediante un enunciado analítico: *sólo puede experimentarse*. Y la experiencia se refiere a una sensación, a un procedimiento experimental. Pero la serie de procedimientos experimentales puede ser muy diversa, y ninguna teoría puede ofrecer todas las maneras con las que un observador puede experimentar una presencia física¹¹⁰.

Cuando una teoría se construye, no se pone a definir lo que la masa “es”. Lo que un término físico significa, eso ya se sabe desde hace mucho tiempo, y no necesita ninguna interpretación. Incluso cuando se prohíben medidas simultáneas con una incertidumbre menor que cierta constante física, la medida hace referencia a la misma magnitud con la que trabajaron Laplace, Einstein o Newton, y con la que en un futuro seguirán trabajando los científicos, para tratar de averiguar cuál es su comportamiento *respecto de otras magnitudes*, sin que por ello se intente comprender o se defina analíticamente qué es una masa o una temperatura, y por qué existe en el mundo. Eso es imposible, y no es lo que interesa a la ciencia. Avanzar en el estudio de los conceptos empíricos no significa estar definiéndolos de nuevo cada vez que un científico elabora una teoría. En todo caso, se definen las unidades, esto es, se caracterizan nuevos procedimientos para obtener una medida básica de una dimensión, pero no se “definen” las dimensiones: estas ya están presentes, y pueden experimentarse; en términos kantianos, es “lo dado”, “lo que ya está ahí”.

Eso es lo objetivo de la Física: la existencia de ciertas cantidades, de ciertas magnitudes, de ciertas *dimensiones*, las cuales constituyen la base para el lenguaje neutral de

¹¹⁰ Por eso Mach (1960, 1993) exige que la masa no se defina analíticamente, sino sintéticamente, operacionalmente, a través de la experiencia. Pero las ecuaciones donde aparece el término “masa” pueden ser muchas: cualquiera de ellas valdría para tener la experiencia de lo que es una masa, para conocer *experimentalmente* a qué se refiere el término.

IV. MODELOS ESTRUCTURALISTAS

observación, para la elaboración de los datos aceptados o “hechos”. Cómo se relacionen esas dimensiones, qué hagan o dejen de hacer, cómo dependan entre sí, eso es tarea de los científicos y de la investigación.

El relativismo no puede alcanzar nunca al lenguaje primario de observación, que nunca constituye un lenguaje fenoménico, sino fisicalista, en el sentido de que toda sensación debe ser traducida al lenguaje de la Física, a los datos de observación, como medida de lo que un observador percibe bajo ciertas circunstancias, sin hacer referencia a otra cosa que no sean esas dimensiones físicas.

Porque cuando los físicos se reúnen en una Conferencia de Pesos y Medidas no especifican unidades diferentes para cada una de las teorías que forman el entramado físico de la época, sino que indican una serie de procedimientos experimentales para obtener, en cualquier laboratorio del mundo, esa unidad que servirá de referencia para medir tal o cual dimensión. Así, en la Undécima Conferencia General sobre Pesos y Medidas de París, en 1960, un metro se define como 1.650.763,73 longitudes de onda de la radiación electromagnética emitida por el isótopo ^{86}Kr en su transición entre los estados $2p_{10}$ y $5d_5$. A pesar de su aparente complejidad, esta forma de “definición”, este procedimiento objetivo de obtener una unidad, de experimentar cierta cantidad de una dimensión, para que los científicos puedan ponerse de acuerdo en lo que miden, y elaborar un *lenguaje intersubjetivo*, es relativamente sencillo de obtener en el laboratorio: la radiación emitida aparece como línea roja en un espectrograma.¹¹¹

Igualmente, se dijo que un kilogramo es igual a la masa de $5,0188 \times 10^{25}$ átomos del isótopo ^{12}C . Pero también puede obtenerse un kilogramo haciéndolo corresponder con la masa de 10^{-3} m^3 de agua destilada a $4 \text{ }^\circ\text{C}$. Y definir luego el litro, o un decímetro cúbico, a partir de estas unidades. Para el tiempo, un segundo también puede definirse de distintas maneras, siempre haciendo referencia a un procedimiento experimental. Por convención puede definirse, según la Unión Astronómica Internacional, como $1/31.556.925,975$ de la duración del año tropical 1900, siendo el año tropical el tiempo transcurrido entre dos pasajes sucesivos de la Tierra a través del equinoccio vernal, que ocurre más o menos el 21 de marzo de cada año. Pero la unidad de tiempo puede también *referirse* a los fenómenos atómicos, como el tiempo necesario para que el átomo N realice $2,387 \times 10^{10}$ oscilaciones, o basarse en una transición del átomo de ^{133}Cs . En

¹¹¹ Cf. Alonso y Finn (1986, pp. 16-20). También es la fuente para el resto de las unidades que se definen en esta sección.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

caso de que en otros países se utilicen otra serie de unidades, como el pie o la libra, se establecen factores de conversión, y se obtienen las mismas unidades.

Todo esto son recomendaciones justificadas, que se adoptan internacionalmente, y que tienen en cuenta, desde luego, los desarrollos teóricos de la Física. Lo importante es que proporcionan un *patrón* de medida, una cantidad específica que posteriormente se utilizará para asignar un número a la intensidad de una sensación. *Pero las dimensiones ya existen en la realidad de la teoría y práctica de la Física; son objetivas, no cambian:* las unidades especifican cómo se ha de dividir esa dimensión para saber cuál es su valor numérico, y compararlo con otra serie de medidas. La “masa”, la “intensidad luminosa”, no son cantidades que “pongamos” nosotros en la naturaleza, simplemente las medimos, y vemos cómo se comportan entre sí, cómo dependen unas de otras.

La medida de una unidad hace referencia también a los desarrollos teóricos, por ejemplo, cuando hace uso de la Mecánica Cuántica para medir la longitud o el tiempo con las transiciones de un átomo. Si estar “cargado teóricamente” significa que la forma de obtener las unidades se hace *cada vez más precisa* utilizando las teorías más avanzadas de la Física, toda la ciencia está cargada teóricamente. Resultaría un tanto absurdo que no se utilizaran los descubrimientos más recientes para redefinir más precisamente lo que es una unidad, cómo se obtiene, y que la masa tuviera que ser experimentada para toda la eternidad utilizando una báscula, o que para obtener un kilogramo tuvieran que marchar los científicos a la Oficina Internacional de Pesos y Medidas en Sevres, a comparar su peso con el bloque de platino encerrado en la urna.¹¹²

En definitiva, y por las razones expuestas, coincido con Rivadulla (2003b, p. 243), cuando indica que el *análisis dimensional* asegura la comparación entre los significados de la teoría:

Parece indiscutible que la física dispone de una herramienta infalible para garantizar la homología de las magnitudes. Se trata del análisis dimensional, gracias al cual podemos determinar que el momento relativista es un momento, que la “masa relativista” es una masa, que la “energía en reposo” es una energía, que la edad del Universo que se deduce en cosmología teórica se mide en unidades de tiempo, o que el “radio de Schwarzschild”, al que colapsan estrellas masivas cuando implosionan para formar agujeros

¹¹² La “carga teórica” no significa que los enunciados de observación vengan *predispuestos* teóricamente. La comparación es posible porque los experimentos cruciales, cuando se llevan a cabo, utilizan un lenguaje común fisicalista que se sitúa *por fuera* de las hipótesis alternativas, de manera que las teorías *no* son completamente inmunes a los resultados experimentales.

IV. MODELOS ESTRUCTURALISTAS

negros, tiene unidades de longitud, etc., etc. Ahora bien, ello supone que términos compartidos por teorías separadas por revoluciones científicas son homólogos. Y si lo son, entonces no pueden ser inconmensurables. En particular MN y TR producirían cosmovisiones inconmensurables, pero su inconmensurabilidad no se trasladaría automáticamente a sus términos compartidos, que, siendo homólogos, no serían inconmensurables. De lo contrario la física, como actividad científica, sería impracticable.

Sin embargo, doy un paso más cuando indico que los términos, más que homólogos, son *exactamente los mismos*. Porque, dejando aparte las cosmovisiones y los supuestos cambios del mundo desde los griegos hasta nosotros, hombres de la postmodernidad, cuando Aristóteles, Arquímedes, Jordanus Nemorarius, Newton, Lorentz, Einstein, o Heisenberg, se refieren al peso, como propiedad física de los objetos, *¿puede alguien creer seriamente que no están hablando de lo mismo? ¿Han cambiado, entonces, las experiencias sensibles? Porque ya Locke avisa (Essay concerning Human Understanding, Libro II, Cap. IV, § 6), refiriéndose a las ideas simples:*

If anyone asks me *what this solidity is*, I send him to his senses to inform him. Let him put a flint or a football between his hands and then endeavour to join them, and he will know.

Es decir, que para el caso de la “inconmensurabilidad”, si alguien duda de lo que “es” la masa, la temperatura, o la energía, basta con enseñarle cómo experimentar esa dimensión, y así sabrá lo que es, sin necesidad de conocer más ecuaciones. Si lo que quiere es averiguar qué dice ésta o aquella teoría respecto de estas dimensiones, entonces tendrá que conocer las ecuaciones, para comprender cómo se relacionan con el resto de las dimensiones y cuáles son sus condiciones de mutua dependencia. Evidentemente, son dos cosas distintas.

Hume dice (1994, p. 37):

Si albergamos la sospecha de que un término filosófico se emplea sin significado o idea alguna (como ocurre con demasiada frecuencia), no tenemos más que preguntarnos de qué impresión deriva la supuesta idea, y si es posible asignarle una.

Todos los términos, en Física, derivan de impresiones sensibles, y no se refieren a otra cosa que no sean estas impresiones. La función Ψ , las ecuaciones de Maxwell, los tensores de inercia, el mol, el campo gravitatorio, etc., todo esto no son meros artificios matemáticos contruidos en el aire: se refieren, en última instancia, a una serie de im-

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

presiones sensibles, a una serie de dimensiones, las cuales son también el origen y la razón de ser de estos conceptos teóricos, aunque no exista una escalera inductiva que proporcione la fórmula que los ligue, y la imaginación científica, como pensara Einstein, represente un papel importante. La palabra “inconmensurabilidad” tiene también su impresión sensible: la derivada de la Geometría, donde, por ejemplo, la longitud de una circunferencia es inconmensurable respecto del radio. Pero mucho me temo que va a ser bastante difícil encontrar otro sentido aparte del que tiene en Matemática...

Sólo me resta, entonces, indicar que mi rechazo del isomorfismo entre nuestros modelos y el mundo no significa que deje de creer en la *base objetiva de la realidad*. El relativismo, en todo caso, sería de objetos, pero no de propiedades físicas. La “inconmensurabilidad”, como mucho, es aplicable al lenguaje de datos “mayor que”, “flota”, “rojo”, “esto es un palo”, etc., con el que se trató de fundamentar desde el positivismo lógico nada más y nada menos que la Física. La “inconmensurabilidad” no alcanza a un lenguaje fisicalista científico, tal y como he defendido.

Pero supongamos, con Munévar (2003, Cap. 3, pp. 74-83), que una especie distinta de la nuestra, inteligente, y dotados con otros mecanismos perceptivos, tratara de modelizar la realidad tal y como lo hacemos nosotros. Aunque sus objetos “reales” fueran del todo diferentes a los nuestros, tal que discriminaran el mundo de acuerdo a otras densidades, otros tamaños, otras formas, otros colores, yo afirmo que esos objetos tendrían unas dimensiones espaciales, una masa, una temperatura, una carga, una intensidad luminosa y una energía asociadas, incluso aunque sus sistemas de referencia, escalas y coordenadas fueran de una naturaleza inconcebible para nosotros. *Al final, tendrían que medir*. Y aunque esa medida fuera distinta de la nuestra, y aunque allí donde ellos midieran nosotros no viéramos nada, esos seres llegarían a relacionar y comparar los objetos de su mundo, y tal vez sacarían conclusiones parecidas a las nuestras. Lo importante no es que no podamos traducir sus medidas, sino la *comparación* y la *proporcionalidad* que esos seres establecerían dentro de los límites de su mundo.

Para llegar a la Teoría de la Relatividad, no hace falta que “vean” lo mismo que nosotros. Basta que abstraigan las propiedades físicas fundamentales de aquello que ven y esquematicen su comportamiento en una representación. Para ello tendrán que experimentar, y desde luego no necesitan hacerlo con nuestros “objetos”; basta que lo hagan con los suyos. Lo importante, en definitiva, es comparar objetos, no importa del tamaño

IV. MODELOS ESTRUCTURALISTAS

que sean, ni la forma que tengan, ni cómo vengan esquematizados. *Una teoría no supone ninguna ontología: sólo se compromete con la relación que guardan entre sí las medidas de una serie de dimensiones físicas que un observador realiza en determinadas circunstancias.*

Para todas las especies de todos los mundos posibles habría cuerpos, pesos, resistencias al movimiento, discusiones sobre el *plenum* y el vacío; e incluso, si fueran muy inteligentes, darían con el principio de inercia. Después, si su inteligencia fuera realmente buena, se preguntarían si todo es relativo a su percepción; pero al final, en un *summum* racional, concluirían que no todo, y que la realidad tiene componentes objetivos, aunque estructurables de distintas maneras. Esos seres inteligentes acabarían comprendiendo que el relativismo tiene un límite... justamente allí donde comienzan los conceptos científicos.

4.4. Recapitulación

El modelo es una representación porque ofrece una imagen de la realidad, un esquema de lo que ocurre, una *síntesis* de lo que hasta la fecha se conoce de un determinado fenómeno. Esta representación no se ejemplifica en la naturaleza, principalmente porque *es imposible establecer cualquier tipo de correspondencia matemática entre los elementos del modelo y los elementos de la naturaleza*. En sentido estricto, la naturaleza no tiene definidos sus objetos antes de que nosotros los distingamos mediante la representación. No hay una serie de individuos u objetos fijos, inmóviles y eternos que pudieran constituir el dominio o recorrido D dentro del cual se dieran las relaciones y propiedades. La realidad es esquematizable de múltiples maneras, mediante modelos compatibles o incompatibles entre sí, dependiendo de las teorías utilizadas como pilares para su construcción. *La naturaleza no tiene "elementos"*, no es un conjunto matemático donde puedan referirse las flechas de una aplicación que se estableciera desde el modelo. La ciencia trata la naturaleza *como si* fuera un sistema, *como si* todos los estados posibles de cosas estuvieran ligados entre sí mediante una serie de operaciones, reglas y fórmulas a partir de los cuales es posible describir y predecir, hasta cierto límite, los estados futuros, presentes o pasados. Pero esta *suposición metodológica previa* no implica que la naturaleza, en sí misma, sea una estructura algebraica sobre la que sería posible estable-

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

cer un homomorfismo biyectivo, tal que los elementos y operaciones de la representación se vieran ejemplificados en la realidad a modo de imagen realizada. La representación abstrae, destaca, mide y reconstruye; pero nuestros modelos no son imágenes que reflejen la estructura real de las cosas, ni constituyen una réplica o copia de las cosas. Sólo tocamos la realidad en la medida, y no estamos justificados, desde el punto de vista lógico, a establecer correspondencias, aplicaciones, homomorfismos o biyecciones. Sencillamente, la naturaleza y el modelo son entes absolutamente diferentes, y no pueden compararse como totalidad.

Una teoría física no especifica cuáles son los objetos reales de la naturaleza y cuáles son los falsos o ficticios. La teoría no se dedica a decir qué es real y qué es ilusorio; *no decide* acerca de los objetos de la realidad. Hay infinitas maneras de representar una misma realidad, todas ellas perfectamente compatibles entre sí; en cada representación varía el número de objetos y la naturaleza de las relaciones, sin que sea posible decidir cuál de estos modelos es isomórfico al mundo. Los sistemas equivalentes, en Física, muestran cómo es posible esquematizar de distintas maneras un mismo fenómeno, variando los cardinales de los conjuntos y sin que sea posible decidir cuál de ellos es más verdadero que los demás. Creo haber dado suficientes ejemplos para demostrar que la equivalencia física no puede caracterizarse extensionalmente, y que es necesario acudir a otra noción más allá de la de isomorfismo que pueda reflejar la relación que se da entre la naturaleza y el modelo. Una *síntesis*, tal como yo la entiendo, no queda caracterizada extensionalmente y no se pronuncia sobre la realidad de los objetos que actúan como subsistemas dentro de los modelos. La síntesis sólo se compromete con un conjunto de ecuaciones que suministran la información física disponible sobre un fenómeno, y permite que varias representaciones se refieran a una misma cosa. Al mismo tiempo, mi propuesta permite que las representaciones físicas equivalentes se combinen y complementen entre sí, mediante teoremas que permiten su sustitución y conversión, pasando de unos sistemas a otros en beneficio del cálculo y de la predicción. Lo que decide qué sistema se ha de usar frente a otro es el aspecto práctico que interesa al científico, la necesidad de cálculo de la magnitud que interesa predecir. No hay un sistema isomórfico al mundo, ni más real que los demás: lo que prima, a la hora de escoger, reducir o sustituir un sistema por otro, son cuestiones de *conveniencia*. Los sistemas de referencia “últimos” son relativos a la cantidad que interese calcular, y se utilizan como forma de simplificar las ecuaciones y rebajar el grado de libertad del sistema, teniendo

IV. MODELOS ESTRUCTURALISTAS

en cuenta los datos que se conocen y las condiciones iniciales en las que tiene lugar el fenómeno.

Ahora bien, esto no significa que no haya un *orden* en la sistematización de la realidad, que “todo valga” o que no pueda efectuarse una comparación racional entre teorías. Hay una *base objetiva* para la construcción de los modelos, y esta base es la *medida* de ciertas dimensiones que garantizan la referencia de los términos científicos y que permiten huir de un relativismo radical que alcanzara las raíces de la ciencia. He expresado con claridad que la incompatibilidad entre teorías, el hecho de que partan de principios y ecuaciones contradictorias desde un punto de vista lógico, no significa que sean “incomensurables” entre sí, o que no pueda establecerse una comparación racional entre ellas valorando sus predicciones y cotejándolas con las observaciones. El análisis dimensional, en este sentido, asegura la *referencia* de los términos y constituye el lenguaje fisicalista fundamental a partir del cual elaborar las distintas representaciones.

Así, el relativismo de objetos, las distintas maneras de esquematizar un mismo fenómeno, no supone un relativismo de las propiedades fundamentales de la Física. Términos como “masa”, “energía”, “momento cinético”, etc., se refieren *directamente* a la realidad, y no pueden definirse analítica o sintácticamente como si fueran operadores lógicos dentro de un lenguaje formal, sino que tienen que *experimentarse*. La prueba de que los físicos consideran estos términos como directamente comprensibles e independientes de las teorías está en la manera que tienen de definir sus unidades: segundo, amperio, metro, etc., no son sino *cantidades determinadas de ciertas dimensiones*, patrones objetivos para obtener en el laboratorio, dentro del menor error posible, cierta magnitud con la que se medirán las cantidades asociadas a esa dimensión. Las dimensiones no se definen: *se experimentan*. Las unidades de estas dimensiones se “definen” *operacionalmente*, mediante procedimientos experimentales que aseguran la intersubjetividad y universalidad de las mediciones posteriores.

CAPÍTULO V

EL PAPEL DE LAS ANALOGÍAS EN FÍSICA

5.0. Introducción

Nuestra primera crítica al isomorfismo, tal y como esta relación es caracterizada extensionalmente, ha mostrado la imposibilidad de considerar los modelos y la naturaleza como estructuras algebraicas sobre las que pueda definirse una aplicación biyectiva. Pero tal vez sea posible, a la hora de caracterizar la relación entre representación y mundo, establecer una noción, en principio, más débil que la de isomorfismo, como pueda ser la “similaridad”, o “parecido” que el modelo mostraría respecto de la realidad. El objetivo de este capítulo es criticar esta noción y defender que *las analogías sólo pueden darse entre representaciones, nunca entre representación y realidad*.

La Sección 5.1: “Analogías entre sistemas físicos”, ofrece una discusión crítica de la filosofía de Campbell, Nagel, Hesse, Harré o Black, quienes exigen que la teoría especifique modelos que visualicen el contenido empírico de las estructuras formales por medio de leyes más familiares o sistemas ya conocidos, donde pueda decirse si hay una analogía positiva, negativa o neutral respecto del sistema análogo. Los modelos icónicos formarían parte esencial de las teorías y relacionarían sus estructuras puramente matemáticas con sistemas semejantes a partir de los cuales pudieran establecerse predicciones y descubrir la existencia de entidades hipotéticas.

La Sección 5.2: “Límites de los modelos icónicos”, ofrece un análisis crítico de las limitaciones de estos modelos analógicos con la ayuda de Duhem y Hempel. Primeramente, destaco la confusión que puede suponer que teorías tan complejas como la Mecánica Cuántica o la Teoría de la Relatividad puedan ser explicadas por medio de la Mecánica Clásica, por ejemplo, cuando lo natural es que precisamente ésta fuera explicada en función de aquéllas, mucho más precisas. La crítica de Duhem a los modelos

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

mecánicos de Thomson pone de manifiesto las limitaciones, paradojas y contradicciones de estos modelos transitorios, al tiempo que expresa una mayor confianza en un sistema teórico puramente lógico basado en ecuaciones fundamentales. Estos modelos de bajo nivel, sin embargo, pueden ser útiles siempre que contribuyan a la *unificación* de teorías abstractas. Para Hempel, la reducción de sistemas electrónicos a mecánicos, por ejemplo, se basa en una correspondencia de términos y en la identidad formal de los distintos grupos de ecuaciones. También destaca su uso *limitado* (no siempre hay identidad formal entre ecuaciones) y su utilidad *heurística* a la hora de formar teorías más elaboradas que deduzcan deductivamente un *explanandum*. Coincido con Hempel y Duhem en que estos modelos analógicos no deben formar parte de las teorías, pero destaco que la investigación mediante modelos contruidos a partir de hipótesis transitorias forma parte fundamental del método científico, que no sólo consiste en justificar deductivamente. Mediante un ejemplo y una tabla de equivalencia formal, muestro cómo distintos sistemas vibratorios obedecen a una misma ecuación diferencial, cuya resolución y análisis puede ser aplicada globalmente a todos los casos, *unificando* de esta manera el contenido empírico en fórmulas más generales.

La Sección 5.3: “Crítica de la similaridad (I)”, vuelve a mostrar la imposibilidad de definir extensionalmente la naturaleza, como si fuera un conjunto con sus elementos y operaciones definidas matemáticamente. Mediante el análisis conjuntista de la similaridad, que exige que se conserve el número de relaciones entre conjuntos para poder establecer una correspondencia entre ellas, me remito a una serie de ejemplos donde los sistemas se transforman en otros equivalentes precisamente para reducir el número de relaciones y simplificar las ecuaciones con vistas al cálculo predictivo. Defiendo que no puede extrapolarse un concepto matemático como el de “semejanza” a un lugar donde no tiene ningún sentido. Las analogías se dan entre representaciones, no entre la representación y la naturaleza. De modo general, la similaridad supone que la realidad y la representación comparten algún aspecto, en el cual podría establecerse algún tipo de correspondencia. Mediante una serie de fotografías de una galaxia trato de ilustrar que la realidad y la representación no son cosas comparables sobre los que cupiera decir dónde se parecen y dónde no.

5.1. Analogías entre sistemas físicos

V. EL PAPEL DE LAS ANALOGÍAS EN FÍSICA

La exigencia de que los modelos formen parte de las teorías, si bien de manera distinta a la del estructuralismo estudiado en el Cap. IV, § 4.1, es una idea de Campbell (1957), quien, basándose en los estudios de Peirce sobre modelos icónicos, sostuvo que una teoría, además del diccionario y sus hipótesis, debe llevar asociada una *analogía*, una estructura similar a un sistema del que ya se conocen sus leyes características. De este modo, no es suficiente deducir una ley experimental a partir de una serie de hipótesis que actúan como premisas, sino proporcionar una analogía con otras leyes más conocidas y familiares, con el fin de que la ley quede explicada. Sólo entonces puede decirse que una teoría explica una serie de leyes¹¹³.

En la teoría cinética de los gases, las analogías se establecen con un enjambre de partículas, suponiendo que las moléculas del gas chocan elásticamente, sin pérdida energética, y que su movimiento obedece a las leyes de Newton. Los axiomas de la teoría, que relacionan masas, velocidades y energías, adquieren así un sentido físico, porque se hace referencia a otros sistemas de los que se tiene una información suficiente. De igual modo (cf. Campbell, *op. cit.*, pp. 123 y ss.), una teoría matemática como la de Fourier, que relaciona la temperatura absoluta θ , la conductividad térmica λ , la densidad ρ , el calor específico c , el tiempo t , y las coordenadas espaciales x, y, z , en una plancha de longitud infinita:

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) = \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t},$$

sólo tiene sentido si se establece una correspondencia entre las numerosas leyes experimentales de la conducción del calor en planchas finitas de diversos materiales, ya que estas leyes comparten la misma forma matemática que la ecuación teórica y se refieren a las mismas propiedades, relaciones y constantes. La teoría explica estas leyes porque existe una analogía (una forma matemática común) entre la teoría de Fourier y las leyes experimentales.

Como el propósito de la ciencia, para Campbell, es el descubrimiento y la incorporación de las leyes experimentales en teorías que las expliquen, todas las teorías de la

¹¹³ Véase Losee (1997, pp. 143-148).

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Física tienen que poder aplicar con éxito estas analogías, para las que no existen ninguna regla inductiva y que dependen fundamentalmente de la imaginación del científico, quien escoge, entre las muchas herramientas matemáticas que dispone, aquella que muestra algún parecido con las leyes experimentales.

Una posición similar es defendida por Nagel (1961, p. 90), quien manteniéndose dentro de los requisitos del positivismo lógico aboga por una interpretación semántica o modelo del cálculo abstracto que provea a la estructura de contenido empírico, en términos más o menos familiares o visualizables. La interpretación parcial de la estructura abstracta es entonces un modelo de la teoría, una interpretación semántica del lenguaje teórico L_t . Para la teoría atómica de Bohr, por ejemplo, se da una interpretación de la teoría en función de un sistema de bolas de billar, de forma que la teoría, en esta interpretación, resulta ser verdadera. Pero, además, la teoría de Bohr tiene un modelo icónico, porque es similar a un sistema de bolas de billar moviéndose alrededor de un núcleo, donde algunas de ellas saltan de una órbita a otra en determinados momentos. El modelo de TC (teoría más reglas de correspondencia) resulta ser semántico e icónico, pues al mismo tiempo que interpreta la teoría específica un sistema similar del que puede decirse dónde se parece y dónde no, existiendo una *analogía positiva* entre ellos allí donde sean similares, una *analogía negativa* donde no lo sean, y una *analogía neutral* donde no se conozca cuál es el caso¹¹⁴.

Ahora bien, parece bastante difícil pretender obtener un modelo en términos “familiares” del modelo cuántico de un gas de fonones o de un electrón libre, o describir en términos más conocidos una descripción cuántica estadística del estado de un sistema. Esto supondría poder describir la trayectoria de un punto en el espacio fase bidimensional, o especificar un tamaño para cada celda que describe el sistema menor que h^3 . Por desgracia o por suerte, el mayor o menor grado de familiaridad o accesibilidad de una fórmula no tiene cabida en Física, donde las cosas se complican si tienen que complirse, debido a los resultados experimentales y al requisito de consistencia con el resto del cuerpo científico.

Así que Hesse (1966, p. 19), aunque de acuerdo en lo fundamental de las anteriores propuestas, es decir, de acuerdo con que la teoría no sólo pueda, sino que *deba* espe-

¹¹⁴ Véase Hesse (1966, p. 8).

V. EL PAPEL DE LAS ANALOGÍAS EN FÍSICA

cificar modelos icónicos que relacionen la estructura matemática con sistemas similares, concibe el modelo icónico como

cualquier sistema construible, describible o imaginable [...] que tenga la característica de hacer predictiva una teoría.

Por “hacer predictiva una teoría” se refiere a las nuevas predicciones desarrolladas a partir de las ecuaciones de Maxwell, por ejemplo, como las ondas de radio, que se supone que son cosas diferentes de la teoría y que caen lejos de su alcance, y que necesitan, para su explicación, de modelos icónicos, de estructuras análogas que, por así decirlo, desarrollen el contenido empírico *potencial* de la teoría. La estructura formal, por sí sola, es insuficiente, y necesita especificarse en sistemas reales, mediante la asignación de tales modelos. La teoría-diccionario no puede, sin ayuda de estos iconos, referirse a los fenómenos donde tiene sentido preguntarse si son una buena o mala explicación. Las interpretaciones de los símbolos ya están contenidas en la teoría, de modo que conocemos el tipo de fenómenos al que se aplicará, porque las teorías incluyen modelos relevantes que ponen en conexión la parte puramente formal con la realidad.

Además del papel importante que este tipo de modelos representan en el *contexto de descubrimiento*, a la hora de proporcionar pistas y nuevas hipótesis sobre la estructura matemática de las teorías, y de extender el conocimiento hacia nuevos campos de observación, contribuyendo al desarrollo de una teoría ya establecida, los modelos icónicos, según esta corriente, interpretan los términos teóricos y relacionan las teorías con los fenómenos, sin las dificultades lógicas que tenían las reglas de correspondencia, pues se limitan a expresar interpretaciones semánticas donde las teorías pueden ser o no ser verdaderas, manteniéndose neutrales sobre el alcance de la teoría, sin tratar de aplicarla de modo universal¹¹⁵.

También Harré (1970) considera que este tipo de modelos deberían ocupar el papel central de las teorías, mientras que los sistemas deductivos tendrían que ser relegados a un papel meramente heurístico. La construcción de teorías sería como edificar

¹¹⁵ Hesse (*op. cit.*, p. 80-81) diferencia entre las relaciones de semejanza y las relaciones causales entre los sistemas análogos, como, por ejemplo, en las propiedades del sonido y de la luz. En este caso, las relaciones de semejanza son independientes de las relaciones causales (leyes de reflexión, refracción, etc.).

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

“mecanismos hipotéticos”¹¹⁶, donde se considerarían las hipótesis que afirman la existencia de entidades teóricas y las hipótesis que pretenden describir el comportamiento de esas entidades; serían las primeras hipótesis, las que tienen que ver con el descubrimiento de nuevas entidades, como ondas de radio, neutrinos y capilares las que realmente contribuirían al progreso científico. La teoría, para lograr este objetivo, tendría que proporcionar los criterios demostrativos de su existencia, como propiedades físicas o efectos observables, que permitieran decidir acerca de su realidad.

Esto, según Harré, es lo que sucedió con los elementos de la tabla periódica predichos por Mendeleiev, con los virus, los positrones y los neutrinos; los criterios de reconocimiento se vieron satisfechos y la ciencia decidió aceptar su existencia. Sin embargo, en otros casos no se han visto cumplidos, como en el planeta con una órbita interior a Mercurio, o como la suposición del éter mecánico a través del cual se propagarían las ondas de la luz. Por último, entidades que se consideraban sustancias, como el calórico, habrían sido reinterpretadas como cualidades (energía cinética media), también porque no se encontraron cumplidos los criterios de satisfacción. En todo caso, lo importante es que las teorías hagan hipótesis existenciales y postulen realidades que permitan descubrir los mecanismos plausibles de la naturaleza.

Respecto del ajuste o correspondencia del modelo con la realidad, puede haber diversas posturas para quienes defienden que este tipo de modelos icónicos constituye lo esencial de la investigación científica. En Black (1966, pp. 219, 227), por ejemplo, encontramos la exigencia de que el modelo comparta la misma estructura con la realidad: hay un *isomorfismo* entre la realidad y la representación, y el funcionamiento y validez del modelo depende del ajuste estructural con la naturaleza, de su mayor o menor grado de adecuación. Para Hesse (1993, pp. 51-52)¹¹⁷, sin embargo, no es necesaria esta correspondencia de isomorfismo entre el modelo y la realidad, sino que bastaría una relación de *analogía*. La ciencia no tiene que capturar la realidad última de las cosas, describiendo exactamente cómo es la estructura del mundo, sino que basta mostrar, con los recursos disponibles, lo que se conoce del fenómeno. El modelo es un ideal que guarda algún parecido con el fenómeno al que localmente se aplica, y del cual es capaz de predecir su comportamiento. Pero el modelo no muestra categorías esenciales, ni verdades necesarias.

¹¹⁶ Cf. Harré (*op. cit.*, p. 116).

¹¹⁷ Citado en Rivadulla (2004, pp. 138-139).

V. EL PAPEL DE LAS ANALOGÍAS EN FÍSICA

Por último, en cuanto al papel que desempeñan las analogías en la metodología científica, Boniolo, Petrovich y Pisent (2002) señalan que en Física Nuclear se trabaja con una amplia variedad de modelos, métodos y técnicas tomadas de otras ramas de la Física. Entre otras, destacan (cf. *op. cit.*, p. 442-445): las analogías con sistemas clásicos de gas (colisiones), con sistemas hidrostáticos, con cuerpos rígidos, con sistemas de la Física Atómica, con sistemas de moléculas, con la superconductividad, y con el electromagnetismo clásico. Los modelos muestran cierto parecido con otros modelos tomados de dominios diferentes, permitiendo una serie de ventajas, como el uso de formalismos matemáticos ya conocidos, la transferencia de ideas, sugerencias, conceptos y relaciones que se utilizan en otros campos, así como la visualización de sistemas físicos que en principio no resultan demasiado intuitivos. Por ejemplo, en los modelos colectivos se utiliza la analogía con un objeto que vibra y gira; la fisión nuclear se trata de comprender apelando a la deformación de una gota, hasta que se separa en dos partes; en el modelo de capas, el parecido se muestra con un sistema planetario; en el modelo vibratorio-giratorio, las conexiones entre momentos pueden visualizarse de una manera clásica...

Sin embargo, para Boniolo *et al* (*ibid.*, p. 445), las analogías no deben considerarse al pie de la letra, a riesgo de una interpretación errónea de los procesos fundamentales que ocurren en el núcleo. Así, aunque la Física Nuclear no considere los efectos de la Teoría de la Relatividad, al despreciar la aniquilación de partículas y por las bajas energías, estamos hablando de Mecánica Cuántica, cuyas reglas son esencialmente diferentes a todas las demás teorías.

On one hand, the analogical procedure is a useful guide to intuition in choosing suitable formalisms able to organise and foresee nuclear phenomena, but, on the other hand, if it is taken too seriously, it may create a wrong prejudice on the real structure of the nuclear object¹¹⁸.

2. Límites de los modelos icónicos

¹¹⁸ Cf. *ibid.*, p. 445. Los modelos teóricos del núcleo serán considerados con mayor atención en el Cap. VIII, § 8.4

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Ya en el análisis de Boniolo *et al* (2002) del apartado anterior puede verse con claridad las limitaciones de estos modelos analógicos, y el peligro de confundirlos con la naturaleza real de las cosas. En el fondo, ninguna ecuación de teorías tan complejas como la Mecánica Cuántica o la Teoría de la Relatividad puede ser sustituida por otras más familiares que aclaren el contenido empírico de las estructuras formales. Desde el contexto de justificación, las nuevas ecuaciones se bastan por sí solas para explicar los fenómenos que caen bajo su alcance, y no necesitan referirse a las teorías antiguas. La verdad es una cuestión de precisión, y el progreso científico consiste en una mayor precisión de las ecuaciones, a la hora de describir, explicar y predecir las nuevas mediciones que se van efectuando. En todo caso, son las teorías menos precisas, como la Mecánica Clásica, las que deben ser explicadas a partir de las teorías más precisas, como la Mecánica de Schrödinger, y no al revés. Los modelos “visualizables” tienen unas limitaciones muy importantes, y nunca pueden formar parte del núcleo de las teorías. Este apartado desarrollará esta idea con ayuda de las críticas de Duhem (1991) y Hempel (1988) a los modelos basados en las analogías.

Para Duhem (1991, p.70), los modelos son representaciones concretas de los fenómenos basados en cosas materiales y visibles, objetos mentales que consideran necesarios para explicar los fenómenos en profundidad. Así, para W. Thomson, explicar un fenómeno es crear un modelo mecánico que reproduzca mecánicamente sus efectos. Para estudiar el calor, por ejemplo, se consideran los intercambios termodinámicos como movimientos de átomos en el interior de los cuerpos.

Los modelos sólo tienen un objetivo: crear una imagen palpable y visible de las leyes abstractas que la mente no podría comprender sin ese modelo. El modelo imita más o menos la realidad, y es un aparato sujeto a las leyes del álgebra por medio de signos accesibles a la imaginación. Las leyes se comparan con el modelo algebraico que las imita. No importa que una misma ley pueda ser representada por diferentes modelos. Las contradicciones y las incoherencias se producen al escapar del dominio de la lógica y controlar los fenómenos bajo estos modelos producidos por la imaginación, como en el caso del éter.

Sin embargo, un científico nunca consideraría un modelo como una explicación verdadera; el modelo ayuda a concebir, es instructivo, pero resulta en la mayoría de los casos inútil y complicado para quien comprende su significado sin la existencia de

V. EL PAPEL DE LAS ANALOGÍAS EN FÍSICA

complicados aparatos donde tendría sentido la teoría. Así, para un físico como Hertz, la teoría de Maxwell no es una serie de modelos, sino de ecuaciones. El sistema se construye según las reglas estrictas de la lógica; las consecuencias obtenidas por medio de la deducción se comparan después con los hechos. No hay una sucesión incompleta de modelos para representar las diversas propiedades del éter, sino una secuencia de hipótesis coordinada por medio de la lógica: no se buscan explicaciones mecánicas, basadas en las moléculas de un determinado cuerpo representado.

Los modelos tienen un carácter provisional, de acuerdo al fenómeno a estudiar, y nunca pueden constituir verdades necesarias que nos hagan comprender la esencia de las cosas. Sólo se seleccionan un conjunto de objetos y propiedades relevantes que varían en función del experimento, sin el desarrollo unitario y coherente como el que cabría esperar de un sistema lógico. Hertz ha desarrollado una teoría del electromagnetismo con las ecuaciones de Maxwell como principios, sin que sea necesario referirlas a las consecuencias obtenidas por pruebas experimentales. Si tratamos con modelos, aparte de obtener contradicciones y oscuridades, limitamos la teoría a los efectos que alcanza en semejantes modelos. Por el contrario, cuando Helmholtz establece una electrodinámica basada en los principios de la electricidad y procede lógicamente en su derivación de leyes, superamos las paradojas y ambigüedades a las que da lugar el uso de los modelos (Duhem *op. cit.*, p. 90).

Acerca de la opinión común de que el abandono de la coherencia lógica es útil para el descubrimiento de nuevos hechos, Duhem piensa que la sustitución de unos modelos por otros independientes entre sí no constituye ningún seguro para el progreso científico. Los modelos tienen un sentido instructivo, no constituyen instrumentos de descubrimiento. La Termodinámica ha sido creada como teoría abstracta y sólo a partir de sus éxitos deductivos, dice Duhem, se ha buscado la explicación para los fenómenos energéticos en las colisiones de las moléculas, que a su juicio no ha añadido nada nuevo a lo que la teoría ya contenía en sus principios. La Termodinámica no había solicitado ayuda de la Mecánica para entender sus procesos y ésta última se la ha otorgado creyendo explicar cuando en realidad confunde (*ibid.*, p. 95). El descubrimiento de la Termodinámica ha sido obra de la lógica más que de los modelos¹¹⁹.

¹¹⁹ En oposición frontal a lo que piensa Hacking. Véase Cap. VII, § 7.1

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Sin embargo, la historia de la Física muestra que la búsqueda de analogías entre dos distintas categorías de fenómenos es uno de los métodos más útiles en la construcción de las teorías físicas. Pero esto se debe a que se busca lo que tienen en común distintas teorías y se las reduce a principios abstractos. Mediante las mismas ecuaciones podemos ahora establecer cualquier tipo de fenómeno, de tipo eléctrico, magnético o de cualquier otro que se deje subsumir. Más aún, ahora contamos con la ventaja de que leyes que se han demostrado válidas para un fenómeno, a través de la unificación, pueden ser aplicadas a otros campos que eran heterogéneos: por medio del álgebra hacemos corresponder unos fenómenos con otros. Cada vez que resolvamos un problema acerca de la distribución de temperatura resolvemos otro en electrodinámica, y al revés, con lo cual obtenemos un nuevo método de descubrimiento. Estas analogías no serían estrictamente modelos icónicos, sino que corresponderían al proceso de unificación de teorías abstractas. Los descubrimientos realizados presuntamente por el uso de modelos en realidad han sido hechos a través de sistemas abstractos de termodinámica y electrodinámica clásica, piensa Duhem.

El contexto de descubrimiento no tiene reglas fijas. Puede haber inconsistencias en una teoría que a la larga produzcan mayores logros que lo que se creía bien asentado de una teoría. Así, el uso de modelos, no duda en reconocer Duhem, ha guiado a los físicos hacia descubrimientos que tal vez no se hubieran logrado por otros medios (*ibid.*, p. 99). Si la Física es, en última instancia, un método de clasificar fenómenos, sería absurdo pensar que sólo hay una forma de clasificarlos, como pensar que sólo existe una metodología propia del hacer científico. Coordinar artificialmente diferentes aspectos de una teoría puede resultar mucho peor que considerarlos momentáneamente dispares y permitir la incoherencia antes que la economía del pensamiento. La unidad de la ciencia, a la que aspiran todos los físicos, no había permitido hasta la fecha el uso de modelos incoherentes, pero la imaginación, que necesita cosas sensibles y concretas, también juega un papel fundamental en el descubrimiento de nuevos hechos y teorías, con su propuesta de modelos transitorios.

Las críticas de Hempel (1988) son similares a las de Duhem. Su punto de partida son también las afirmaciones de Thomson (1884, p. 271):

V. EL PAPEL DE LAS ANALOGÍAS EN FÍSICA

Creo que el test de “¿Comprendemos o no un punto particular de la Física?” es “¿podemos elaborar un modelo mecánico de él?”.

Para Hempel, estas afirmaciones son una variante de la exigencia de reducir los enunciados científicos a las leyes más familiares, considerando que ahora son las leyes de la mecánica los principios conocidos. Aunque no se pretenda identificar el modelo con lo representado, se supone que existe una analogía entre la realidad y la representación, una semejanza formal entre las leyes del sistema modelado y las leyes del sistema mecánico¹²⁰. Así, se considera que la electricidad es reducible a la mecánica, por ejemplo, si imaginamos que el flujo de una corriente eléctrica por un alambre como el flujo de un líquido por un tubo. Para el caso en que el líquido no fluya a una velocidad muy grande, y siendo el radio del tubo pequeño, obtenemos la ley de Poiseulle:

$$V = c \cdot (p_1 - p_2)$$

V es el volumen del líquido que cada segundo fluye por una sección del tubo, y p_2 , p_1 , son las presiones en los extremos del tubo. Ahora bien, esta ecuación es similar a:

$$I = k \cdot (v_1 - v_2),$$

donde I es la intensidad de la corriente que fluye por segundo en una sección del alambre, y v_2 , v_1 , los potenciales de los extremos del alambre; k es la inversa de la resistencia.

Además de esta similitud en las ecuaciones, los factores c y k , son inversamente proporcionales a las longitudes del tubo y del alambre:

$$c = \frac{c'}{l_1}; k = \frac{k'}{l_2}$$

Lo esencial de la analogía entre estos sistemas, entonces, es que puede establecerse una correspondencia entre símbolos, de manera que cada término empírico t_i del sistema que se pretende modelar, S , se le asigne otro término t_i' del sistema icónico, en

¹²⁰ Cf. Hempel (*op. cit.*, p. 427).

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

este caso mecánico, S' . Al sustituir en las ecuaciones unos términos por otros, las leyes siguen siendo verdaderas, por lo que existe una analogía positiva. Hempel (*ibíd.*, p. 428) piensa que un conjunto de leyes que describen el comportamiento del primer fenómeno tiene la *misma estructura sintáctica* que un conjunto de leyes que gobiernan el segundo fenómeno. Las leyes, en este caso, son sintácticamente isomorfas.

Dicho brevemente, pues, la semejanza o “analogía” importante entre un modelo del tipo aquí considerado y el tipo de fenómeno modelado consiste en un *isomorfismo nómico*, es decir, un *isomorfismo sintáctico entre dos conjuntos correspondientes de leyes*. La noción de modelo así obtenida no se limita a los sistemas mecánicos, por supuesto; en el mismo sentido, podemos hablar también de modelos eléctricos, químicos y aun de otros tipos de “modelos analógicos”.

Sin embargo, una de las principales características de estos modelos es su *uso limitado*: dado los dos sistemas, S y S' , el sistema modelado y el modelo, habrá condiciones donde las leyes no sean las mismas, incluso radicalmente diferentes, por lo que el uso de modelos podría llevar a confusión. En el ejemplo anterior, si la longitud del tubo y la diferencia de presión son constantes, obtenemos la siguiente ecuación para el volumen, siendo s la viscosidad del líquido:

$$V = \frac{\pi r_1^4}{8 l_1 s} (p_1 - p_2)$$

Pero para situaciones similares en el sistema electrónico que se trataba de modelar, la expresión de la intensidad I es formalmente distinta, con q como la resistencia del metal del alambre:

$$I = \frac{\pi r_2^2}{l_2 q} (v_1 - v_2)$$

Así, no basta con indicar que dos sistemas son análogos, sino especificar las leyes sintácticamente isomorfas¹²¹. Aunque Maxwell establece una analogía parcial entre las leyes de la luz y las vibraciones de un medio óptico, basándose en la identidad formal

¹²¹ *Ibíd.*, p. 429.

V. EL PAPEL DE LAS ANALOGÍAS EN FÍSICA

de las ecuaciones, y representa las líneas de fuerza de Faraday mediante fluidos de líquidos incomprensibles a lo largo de tubos, allí donde no puede extender la similaridad recurre a la formulación teórica en términos matemáticos y abstractos.

Como las leyes mecánicas que pueden aplicarse a otros fenómenos son muy limitadas, se hace necesario utilizar varios modelos diferentes para la representación. La diferencia entre los modelos y las analogías sería una cuestión de alcance y precisión de los conjuntos de leyes isomórficas. En ocasiones, los modelos permitirían la deducción de enunciados importantes de la Física, no sólo de observaciones, y aplicarían, por ejemplo, los movimientos ondulatorios a ciertos fenómenos de la Óptica y de la Mecánica¹²².

No obstante, para Hempel (*ibíd.*, p. 437) no es imprescindible que formen parte de las teorías, aunque un descubrimiento de identidad formal entre distintos principios puede resultar heurísticamente fructífero, como guía útil en la búsqueda de nuevas leyes explicativas, siempre dentro del contexto de descubrimiento, pero nunca en la justificación propiamente dicha, donde se necesita un *explanandum* inferido mediante la submisión de principios generales, con total independencia de las analogías que la teoría pueda presentar.

Considero que Hempel y Duhem están en lo cierto cuando afirman que los modelos analógicos no deben formar parte de las teorías. Es lo que vengo defendiendo desde el primer capítulo: las ecuaciones son relativamente independientes del uso que se haga de ella o de las condiciones particulares donde se apliquen. Evidentemente, una teoría desarrollada no puede dar un listado de modelos, ni definir extensionalmente cuáles son los sistemas de la naturaleza donde tiene sentido la ley. Ya he expresado que esto sería ir en contra de la universalidad de las leyes, universalidad que tengo forzosamente que defender cuando pienso en un lenguaje de observación neutral basado en el análisis dimensional. Desde el momento en que una ecuación, sea del tipo que sea, liga dos o más magnitudes físicas, y se cumplen las condiciones que especifica el antecedente de la ley, se está comprometiendo con una descripción de la dependencia de esas variables entre

¹²² *Ibid.*, p. 431. Esta es una de las diferencias principales sobre modelos que vengo expresando en esta tesis doctoral. Hay modelos mucho más abstractos y justificados que otros, que permitirían la deducción sucesiva, de forma jerarquizada, de una serie de enunciados científicos importantes, los cuales, a su vez, se situarían a la cabeza de nuevas demostraciones, predicciones y explicaciones.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

sí, y está prediciendo lo que ocurriría de detectarse en una región del espacio-tiempo cualquiera de esas magnitudes.

Aunque las leyes sean “verdaderas” bajo ciertas condiciones (justamente las mismas condiciones mediante las que es posible deducirlas a partir de principios más generales), eso no las hace relativas a una determinada región del mundo, como si no pretendieran ser universales; por el contrario, una vez especificadas las condiciones que hacen a un enunciado científico verdadero, la ley afirma que las relaciones que expresa en la fórmula se dan *en todos los casos* en que tales cantidades se observan y detectan, hasta nueva orden, hasta que otra ley precise la anterior y explique por qué estaba confundida y por qué estaba acertada, apelando a la precisión de los instrumentos de medida o a una nueva síntesis teórica global, mediante cuyo desarrollo es como realmente se abren los caminos a la investigación y los nuevos descubrimientos.

Pero, con todo, y admitiendo la importancia del contexto de justificación, de las teorías, y de que no formen parte de ellas los modelos, al menos los de más bajo nivel y de alcance limitado, no podemos olvidar que, si algo nos han enseñado los trabajos de Kuhn, Koyré, Feyerabend, Hesse, y otros, es a no olvidar el papel relevante del contexto de descubrimiento, de la *investigación* científica, a fin de cuentas, y de que la ciencia es algo más que un conjunto de leyes establecidas como verdaderas; también resulta fundamental que estas leyes puedan ser precisadas, que se avance en los detalles que se conocen y se investiguen diferentes dominios y niveles, para que en definitiva la ciencia marche y no se quede estancada.

En este sentido, la construcción de modelos analógicos constituye uno de los fundamentos de la investigación científica, y su papel ha sido infravalorado tanto por Hempel y Duhem como por el positivismo lógico. Para empezar, establecer modelos basándose en la identidad formal de las ecuaciones, siempre dentro del contexto de investigación, supone un ascenso hacia niveles más generales que *unifican* el contenido empírico disponible hasta la fecha. Esta unificación no es un aspecto secundario del progreso científico, sino que constituye el segundo de sus fundamentos, junto con la diversificación. Más aún, como Kant señala, es el *carácter arquitectónico de la ciencia*, la manera sistemática con que la razón ordena todo el material disponible, lo que hace imprescindible que constantemente se busquen ecuaciones idénticas en distintos fenómenos de características aparentemente alejadas. No se trata de reducir una rama a otra, como si de la Mecánica pudiera derivarse todo el conocimiento del Electromagnetismo, sino de

V. EL PAPEL DE LAS ANALOGÍAS EN FÍSICA

synetizar aquellos aspectos de la realidad experimental que se parecen entre sí, y aquellos otros donde las ecuaciones se diferencian. Los dos procesos son fundamentales.

Los modelos analógicos no justifican ninguna ley: no permiten inferencias deductivas. Sin embargo, como muestran los episodios de Faraday, Maxwell y la búsqueda del éter¹²³, constituyen algo más que una “guía heurística”: son el proceso principal mediante el que un científico accede a unificar el contenido disperso de los fenómenos: contribuyen a la elaboración de la teoría, que más tarde podrá ser probada en otros dominios.

Si la fuerza electromagnética y la fuerza gravitatoria varían inversamente al cuadrado de la distancia, y proporcionalmente al producto de las masas, cargas o fuerzas magnéticas, es lícito preguntarse por las consecuencias matemáticas de esta similitud. Así, Gauss desarrolla mediante una teoría matemática general el estudio de todas las fuerzas y los potenciales aplicable para todos los fenómenos donde se establece la analogía. Mediante sistemas alternativos similares, además, se puede predecir el comportamiento del sistema simulado atendiendo a las consecuencias observables que produce el modelo experimentalmente, si es que los dos sistemas comparten las mismas ecuaciones, al menos en algunos aspectos.

Por ejemplo, sean los sistemas de las *Figuras 5.1* y *5.2*¹²⁴:

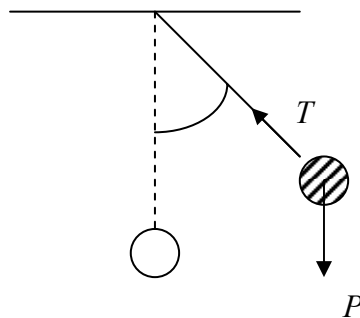


Figura 5.1

¹²³ Lo que Maxwell buscaba fue una teoría de campo independiente de los múltiples modelos mecánicos de éter que se podían proponer. Véase Harman (1990, Cap. IV).

¹²⁴ Los ejemplos se encuentran en Marcellán, Casusús & Zarzo (1991, pp. 126 y ss.)

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

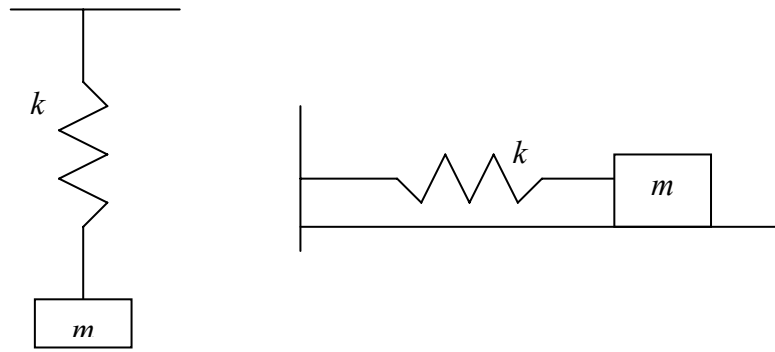


Figura 5.2

Pues bien, estos sistemas dinámicos que vibran en torno a una posición de equilibrio, se rigen por una ecuación como

$$(1) \quad y''(t) + py'(t) + qy(t) = f(t)$$

donde $y(t)$ es el desplazamiento y $f(t)$ la fuerza externa; p y q son constantes positivas cuya expresión depende de las magnitudes físicas propias del sistema que se considera. Es decir, si c es la constante de rozamiento, m la masa, g la aceleración de la gravedad, y k la constante de recuperación del muelle,

$$p = \frac{c}{m}, \quad q = \frac{g}{l} \left. \vphantom{\frac{c}{m}} \right\} \text{ para el péndulo simple}$$

$$p = \frac{c}{m}, \quad q = \frac{k}{m} \left. \vphantom{\frac{c}{m}} \right\} \text{ para los muelles}$$

Ahora no necesitamos estudiar cada caso particular, sino analizar globalmente la ecuación (1). Las soluciones serán válidas para los dos tipos de sistemas, pues se resuelven de la misma manera. Se puede empezar considerando el caso más sencillo donde la fuerza externa $f(t)$ y el rozamiento p son iguales a cero, y hallar su solución general, o bien considerar que existe rozamiento, y estudiar el polinomio característico que resulta. Un tercer caso, resuelto, como los anteriores, en Marcellán, Casasús y Zarzo (*op. cit.*, p. 134), sería considerar que hay una fuerza externa que es una función periódica.

V. EL PAPEL DE LAS ANALOGÍAS EN FÍSICA

dica. El sistema de ecuaciones podrá ser muy complejo, según los grados de libertad y las variables que interesen despejar, pero lo que obtenemos es una serie de modelos según las condiciones particulares físicas del fenómeno que se estudia. Como los sistemas comparten la misma forma, los métodos de resolución serán los mismos, y las soluciones se aplicarán a todos los casos.

Más aún, las analogías se extienden al circuito de la *Figura 5.3*:

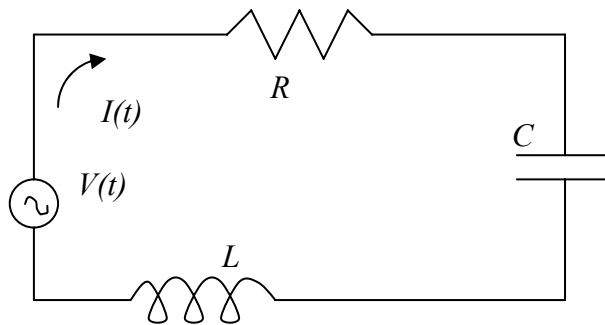


Figura 5.3

En este sistema, aplicando las leyes de Kirchoff, obtenemos la siguiente ecuación diferencial de segundo orden:

$$LI''(t) + RI'(t) + \frac{1}{C}I(t) = V'(t)$$

Multiplicando por L , conseguimos la siguiente *tabla de equivalencia*¹²⁵:

Circuito eléctrico	Sistema mecánico
$LI''(t) + RI'(t) + \frac{1}{C}I(t) = V'(t)$	$my''(t) + cy'(t) + ky(t) = f(t)$
Intensidad, $I(t)$	Desplazamiento, $y(t)$
Inductancia, L	Masa, m
Resistencia, R	Amortiguamiento, c
Derivada del voltaje aplicado $V'(t)$	Fuerza aplicada $f(t)$

¹²⁵ Fuente: Marcellán, Casasús & Zarzo (*ibid.*, p. 139)

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Ahora, si se conocen las posibles soluciones de las ecuaciones de un sistema mecánico, puede aplicarse el estudio a los sistemas eléctricos, mediante la correspondencia entre signos. Ésta es una característica esencial de la investigación científica: cuando se procede a modelizar distintos sistemas físicos, encontramos que comparten la misma forma matemática, lo que unifica el contenido de la ciencia.

En definitiva, Hempel tiene razón en que los modelos analógicos no explican nada, ni justifican, ni son parte de las teorías, ni tal vez ayuden al esclarecimiento de las teorías, de las que ecuaciones que, por sí solas, ya proporcionan información suficiente para quien las entienda. Sin embargo, se equivoca cuando está a punto de relegar el uso de los modelos a los aspectos pragmáticos-psicológicos: los modelos, cuando para su construcción no se utilizan principios de la teoría dominante **T**, sino otros de más bajo nivel, de hipótesis **H**, son tentativas de aproximación al fenómeno y *forman parte del método esencial de la investigación científica, que no sólo consiste en justificar deductivamente*. Que no haya algo así como una lógica inductiva no significa que estos argumentos por analogía no desempeñen ningún papel en la investigación.

Respecto a la *validez limitada* de determinados modelos, esto no constituye ninguna razón en contra de su uso. Para avanzar en determinados dominios, son necesarios distintos acercamientos provisionales y abstraer los resultados positivos de las distintas tentativas, en espera de futuras sistematizaciones teóricas. Las grandes teorías fueron primeramente modelos para un número limitado de casos. Los modelos se amplían, aunque otros no siguen adelante y son abandonados. Por otra parte, no es lo mismo un modelo de universo de Einstein que un modelo de capas del núcleo. La justificación, empírica y teórica, varía, así como el nivel de generalidad. Que existan modelos de validez limitada es tan natural como que existan modelos altamente abstractos; son parte del mismo proceso de investigación: unificación y diversificación; en una palabra, *sistematización*.

5.3. Crítica de la similaridad (I)

De lo dicho hasta el momento, en relación con el papel que las analogías juegan en la representación del conocimiento, se deduce que sólo estoy considerando similitudes entre representaciones, no entre la realidad y el modelo, como parece desprenderse de

V. EL PAPEL DE LAS ANALOGÍAS EN FÍSICA

algunas palabras de los defensores de estos modelos icónicos. Hempel lo describe muy bien cuando habla de “isomorfismo *sintáctico* entre dos conjuntos correspondientes de leyes”. Por “isomorfismo sintáctico”, tal y como lo entiendo, se refiere a las similitudes que se establecen entre dos grupos teóricos; es decir, entre dos representaciones. *Las analogías en ningún momento pueden referirse a la relación del modelo con la realidad.*

Quienes defienden que entre el modelo y la realidad hay una relación de similitud, tienden a pensar que esta relación rebaja la carga metafísica del isomorfismo, de manera que no habría un compromiso “tan fuerte” con la capacidad de la representación a la hora de reflejar las estructuras objetivas del mundo. Se piensa que la noción de similitud es una noción más débil que la de isomorfismo, y que decir que “el modelo se parece a la realidad en alguno de sus aspectos” es una manera neutral y más o menos “natural” de expresar la relación entre la representación y el mundo, sin que exista ningún compromiso con “las categorías verdaderas” del mundo. El lema podría ser: “El modelo, aunque no sea una copia, en algo se parece.”

Mi primera crítica de la similitud, que realizaré en este apartado, seguirá dos estrategias: en primer lugar, analizo la noción de similitud tal y como es definida extensionalmente según la Teoría de Conjuntos; en segundo lugar, me baso en consideraciones generales sobre la naturaleza de la representación, para concluir que no es posible establecer ningún parecido entre el modelo y el mundo, ninguna similitud. Ambas estrategias tienen un objetivo común: mostrar que *la relación de similitud, lejos de ser más débil que la relación de isomorfismo, la supone*. Una vez demostrado esto, es fácil aplicar los resultados del capítulo anterior a la relación de similitud, que tampoco constituiría un modo válido de la representación.

Así, de acuerdo con la primera estrategia, fijémonos en la definición de similitud, tal y como aparece, por ejemplo, en Mosterín (1987, p. 151-152). Primero se define lo que es sistema:

\mathcal{A} es un sistema si y sólo si para algún $A, R_1 \dots R_n$:

(1) $\mathcal{A} = \langle A, R_1 \dots R_n \rangle$

(2) $A \neq \emptyset$

(3) Para cada i ($1 \leq i \leq n$): R_i es una relación en A , es decir, para algún número m : $R_i \subset A^m$.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

A es el universo del sistema, y los R_i son las relaciones entre los elementos de A . La similaridad se define ahora como una relación especial entre sistemas.

Sean $\mathcal{A} = \langle A, R_1 \dots R_n \rangle$ y $\mathcal{B} = \langle B, S_1 \dots S_m \rangle$ dos sistemas. \mathcal{A} y \mathcal{B} son similares si y sólo si (1) $n = m$ y (2) para cada i ($1 \leq i \leq n$): R_i y S_i son relaciones del mismo número ádico o ario (es decir, ambas son monarias, o ambas binarias, o ambas ternarias, o para algún otro número j , ambas son j -arias o j -ádicas).

Es decir, aquí la similaridad se define entre dos estructuras que tienen el mismo número de relaciones y una correspondencia entre ellas. No hace falta que el dominio sea el mismo, ni que el número de objetos se conserve en una y otra estructura. Lo único que se exige es que el número de relaciones entre los elementos de uno y otro dominio sea el mismo.

Si ahora nos fijamos en un fenómeno de la naturaleza, y decimos que la representación es similar al fenómeno, lo que hemos hecho ha sido considerar que el sistema \mathcal{A} corresponde a la representación, y que el sistema \mathcal{B} es la estructura objetiva del fenómeno. Aunque no se exija una biyección entre elementos, topamos con la primera dificultad que señalé en el capítulo anterior para el isomorfismo: ¿los fenómenos de la naturaleza tienen definidos sus estructuras antes de la representación? Porque se sigue considerando que hay un dominio básico B definido extensionalmente como un conjunto de elementos mínimos, y una serie de relaciones entre ellos. Pero en todos los ejemplos del capítulo anterior el “sistema”, tal y como es definido aquí, ha cambiado por completo: los objetos no son los mismos, y las relaciones entre ellos han cambiado. La relación de equivalencia física entre sistemas, recogida en el símbolo “ \equiv ”, no resulta reducible a la similaridad, porque ni siquiera acepta sus presupuestos básicos, a saber, que el número de relaciones entre sistemas equivalentes se conserve.

Sea un sólido que se mueve de manera que todos sus puntos describen trayectorias paralelas a un determinado plano. Este movimiento, definido como un “movimiento plano”, puede reducirse al movimiento de cualquier plano paralelo al primero, porque en todos ellos las velocidades y aceleraciones de los puntos del cuerpo son idénticas. El movimiento plano de un cuerpo rígido es reducible a un sistema de rotación pura, es decir, a un sistema donde la velocidad angular $\vec{\omega}$ del cuerpo se coloca en el llamado “eje instantáneo de rotación”, donde la velocidad mínima se anula. La intersección del eje instantáneo de rotación con el plano se denomina “centro instantáneo de rotación”. Este

V. EL PAPEL DE LAS ANALOGÍAS EN FÍSICA

centro, respecto de los ejes fijos, describe una curva llamada “polar fija” o “base”, mientras que la curva que describe respecto de los ejes solidarios al plano se llama “polar móvil” o “ruleta”. El movimiento se interpreta como si la ruleta rodara sin deslizamiento sobre la base.

En este proceso, han cambiado tanto las relaciones originales entre los elementos del sistema como los componentes “reales” del cuerpo, sin que se haya perdido nada de la información general del sistema. Precisamente, cuando se reduce un sistema a otro, de lo que se trata es que el número de relaciones se simplifique, para que así sea más fácil calcular. El objetivo principal es que, sin perder la información física total de que se dispone, las ecuaciones puedan reducirse a su expresión más sencilla, con el fin de que se pueda operar matemáticamente.

Si se la define extensionalmente, como ocurre en las concepciones estructuralistas y semánticas, la relación de similaridad no puede ser un componente válido de la representación. Todo lo que anteriormente se ha dicho acerca del isomorfismo, todos los ejemplos del capítulo anterior, son de aplicación, *mutatis mutandis*, a la similaridad. No hay una estructura definida en el conjunto imagen, si esa estructura se entiende, como no podía ser de otra manera, al estilo algebraico. No hay un álgebra definitivo en la naturaleza, ni en cuanto al número de elementos (cardinal del conjunto), ni en cuanto al número de relaciones que se dan entre ellos. Porque, ¿de qué sirve decir que el cardinal del sistema de la representación y del sistema de la naturaleza no tiene que ser el mismo, si al mismo tiempo se está suponiendo que comparten exactamente el mismo número de relaciones, ya sean monádicas, terciarias o n -arias? Porque el número de relaciones “ n -arias”, a la hora de representar un fenómeno, puede cambiar, y convertirse en relaciones “ j -ádicas”, “ h -ádicas”, “ m -ádicas”, o “ z -ádicas”, siendo j , h , m y z números arbitrarios cualquiera. No habría un criterio para decidir cuándo dos sistemas son similares. ¡Sistemas físicamente equivalentes ni siquiera serían considerados parecidos, si lo que miramos es el número de relaciones!

Nuevamente, se ha trasplantado una noción matemática a un terreno donde no puede crecer, a un terreno que no conserva las características esenciales que hacen el término aplicable. Dos triángulos son semejantes porque guardan una *proporción*. Lo que aquí se comparan son objetos perfectamente definidos de los que es posible deducir las relaciones que se dan entre ellos. Se comparan estructuras, modelos abstractos, no se hace uso de la realidad física. En Geometría, la semejanza en el plano, por ejemplo, se

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

define como una transformación que a cada punto p asocia el punto p' . Dada una razón k de proporcionalidad, un centro o , y un ángulo θ , la *semejanza* se define (Figura 5.4) como¹²⁶:

$$(\text{longitud de } op') = k (\text{longitud de } op),$$

$$\text{ángulo } (o\vec{p}, o\vec{p}') = \theta$$

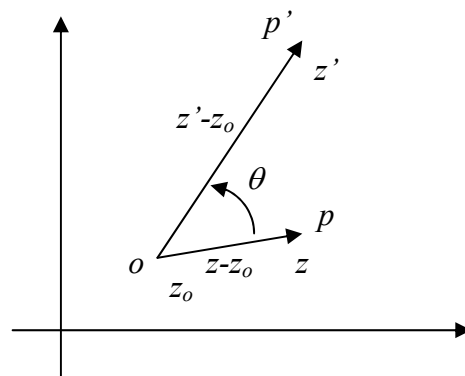


Figura 5.4

Aquí tenemos una relación seria y fundamentada de la semejanza, que está basada en los posibles giros y variaciones de la longitud de un segmento. La “realidad” no interviene para nada. Las relaciones, isomorfismos, semejanzas, giros, homotecias, correspondencias, aplicaciones, etc., se dan entre estructuras matemáticas construidas por nosotros. Pero nosotros no construimos la realidad; tratamos de representarla. Para ello abstraemos y medimos las propiedades físicas que en ella se dan. Pero nunca podremos establecer correspondencias entre representación y realidad, porque la naturaleza no se deja copiar, ni construir; en todo caso, y hasta cierto límite, se deja *re-construir*, lo cual es muy diferente.

Porque, de modo mucho más intuitivo, y olvidándonos de las definiciones complejas que se ofrecen de la similaridad para hacerla diferente y no reducible a la relación de isomorfismo, la pregunta fundamental es: *¿cuándo dos cosas son similares?* Más específicamente: si yo digo que la relación de mi modelo con la realidad es de similaridad,

¹²⁶ Cf. Burgos (1984, p. 21).

V. EL PAPEL DE LAS ANALOGÍAS EN FÍSICA

¿a qué me refiero con *esta* palabra? ¿Cuándo la representación y el fenómeno, el modelo y la naturaleza, *coinciden* en algo?

Porque dos cosas son similares cuando se parecen, pero el parecido no es otra cosa que *igualdad* en algún aspecto. Es decir, que si yo afirmo que mi representación guarda algún parecido con la realidad, estoy indicando que son *iguales* en algún aspecto, y no otra cosa, por mucho que se camufle el concepto “similaridad”¹²⁷. Pero, ¿en qué aspectos puede *parecerse* mi representación a la naturaleza? ¿Hay alguna propiedad, algún predicado, que la representación y la naturaleza *compartan*?

En las *Figuras 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 y 5.10* aparecen representadas varias fotografías de una misma galaxia, la M-81, que corresponde al número 3031 del *New General Catalog (NGC)*¹²⁸. Han sido tomadas por satélites artificiales capaces de detectar buena parte de las radiaciones del espectro electromagnético. Cada una de estas fotografías representa un aspecto de la galaxia; el objetivo (del Hubble, por ejemplo) se concentra en una determinada zona del espectro electromagnético y abre el obturador para dejar pasar la luz que le llega. La intensidad de esa luz, la frecuencia, es lo que configura la fotografía, que en cada caso me da un componente objetivo de la realidad. Se puede pensar que, en conjunto, esa serie de imágenes me proporciona una imagen de la galaxia más completa que si tuviera sólo una (la del espectro visible, por ejemplo); así, en la *Figura 5.10* se ha representado la galaxia superponiendo las imágenes de la radiación ultravioleta y visible, resultando el conjunto algo más sugerente. La información es complementaria, y ninguna imagen es “más verdadera” que las demás, a pesar de los isomorfistas radicales, o de los amantes del mundo “tal y como lo vemos”.

Pero de lo que se trata es de reflexionar hasta qué punto estas fotografías “se parecen” a la Galaxia. Y lo que yo digo es que *no* se parecen, si con ello se quiere indicar que hay dos mundos, uno de la representación y otro del fenómeno, tal que pudiera decirse en qué aspectos son similares y en qué otros no son similares.

Porque lo que hace el telescopio, la máquina fotográfica, y cualquier otro instrumento utilizado para investigar un fenómeno, no es darnos la estructura del mundo, sino *medirlo*, allí hasta donde pueden. Pero la medida tiene un principio y un final, una pre-

¹²⁷ Cf. Platón, *Parménides*, 139d: “Lo semejante experimenta una cierta identidad”; 140a: “Lo semejante está afectado por lo idéntico”.

¹²⁸ Las fotografías las he tomado de la página de Internet de Jorge Enrique Villa Quintero, http://www.astrored.org/doc/articulo.php/jorgeenrique_villa/universo/

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

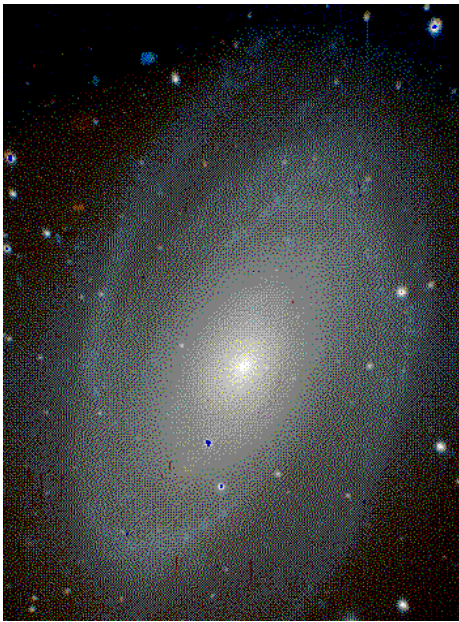
cisión, a partir de la cual no puede ir “más allá”. La representación destaca una dimensión de la naturaleza, y la medida le pone un número a esa dimensión. A partir de cierto umbral de percepción, el sensor, sencillamente, deja de sentir, y no “ve” nada más. Por muchos milímetros que le ponga a la lente al final llega un momento en el que se detiene, y no avanza.

La representación es un conjunto de medidas que se estructuran en elementos mínimos de composición. *Pero no me dicen qué es la realidad, sólo la miden.* Al final, conforme vaya aumentando la escala de estas fotografías, aparecerán unos elementos mínimos que indican hasta dónde han llegado las medidas de la luz. En el caso de la fotografía digital, aparecerán los píxeles; pero también para el caso de la fotografía tradicional, que tiene un nivel de resolución muchísimo mayor, tarde o temprano aparecerán los granos del haluro de plata utilizados para dar “sensibilidad” a la película donde luego se imprime la luz.

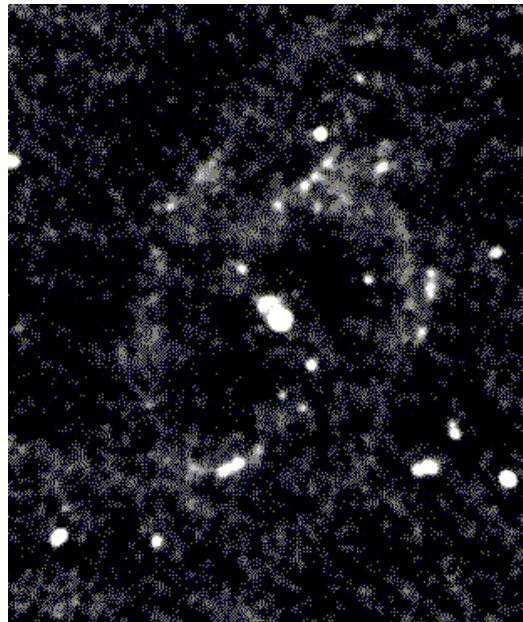
La *Figura 5.11* es un “zoom” efectuado en cierta parte de la fotografía que combina el aspecto visible y el ultravioleta. Pretende dar una idea de lo que ocurriría con todas las fotografías, sin importar la zona del espectro donde se concentren ni su nivel de resolución. Digo “dar una idea” porque estas fotografías, tal y como aparecen en mis figuras, son copias de archivo y, evidentemente, los originales no se hacen digitalmente, sino utilizando una película fotográfica. No obstante, en esos originales, a la luz de un microscopio, por ejemplo, acabarían viéndose los granos de la película, los -por así llamarlos- “elementos indivisibles”, los “átomos”, que indican *hasta dónde ha llegado* la medida. Estos son los elementos mínimos necesarios para que se realice una representación, y ponen de manifiesto que no hay ninguna correspondencia entre los objetos de la representación y los “objetos” de la realidad¹²⁹. Las fotografías, las representaciones, hayan sido hechas con mi máquina o hayan sido realizadas por un telescopio gigantesco más allá de la atmósfera, no me dan la esencia de la realidad, no *deciden* su estructura. Porque, sencillamente, no se parecen al mundo. En todo caso, *se parecerán entre sí*. Pero aquí ya hablamos de similaridad entre representaciones, y la palabra “similaridad” cobra un nuevo sentido.

¹²⁹ La realidad no tiene elementos últimos donde se detenga.

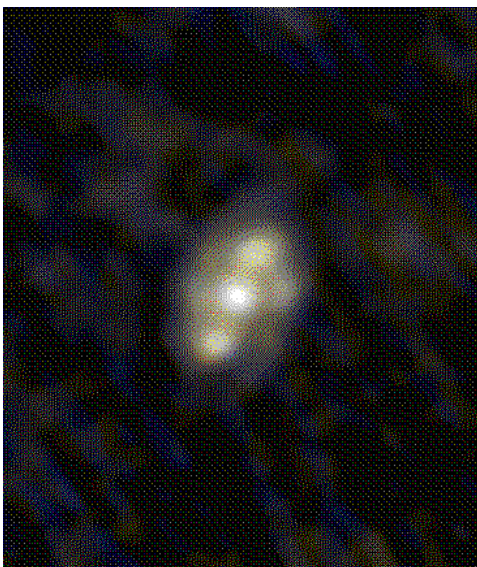
V. EL PAPEL DE LAS ANALOGÍAS EN FÍSICA



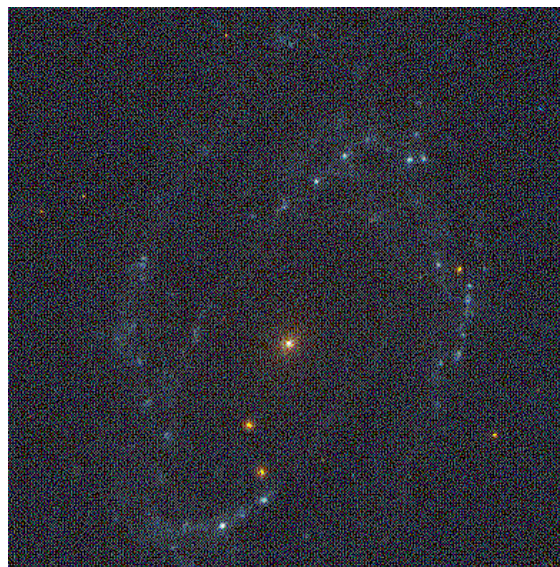
Luz visible
Figura 5.5



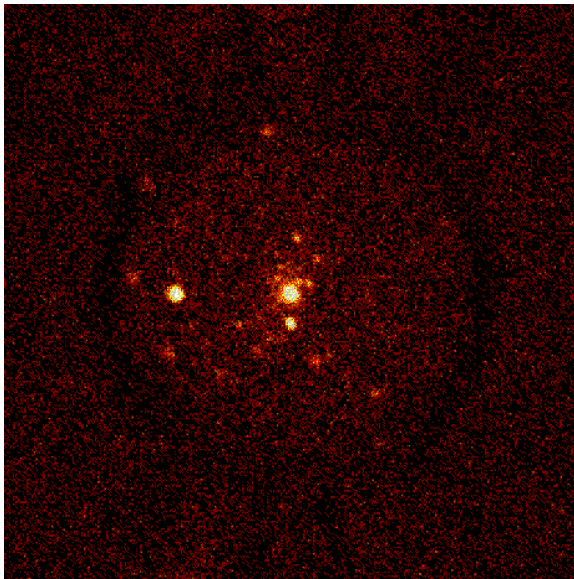
Ondas de radio
Figura 5.6



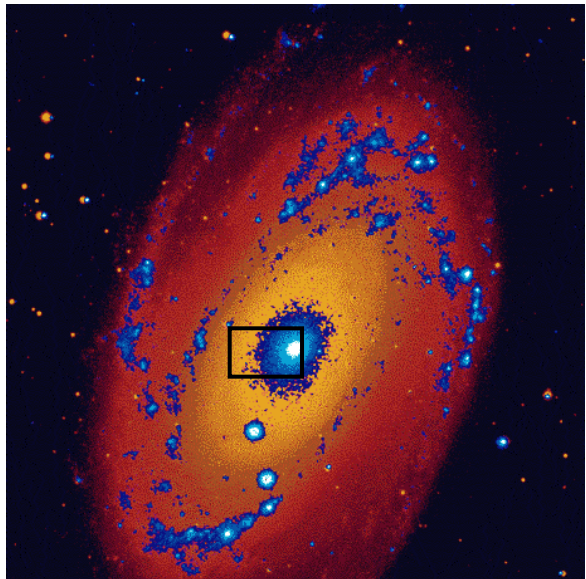
Infrarrojo
Figura 5.7



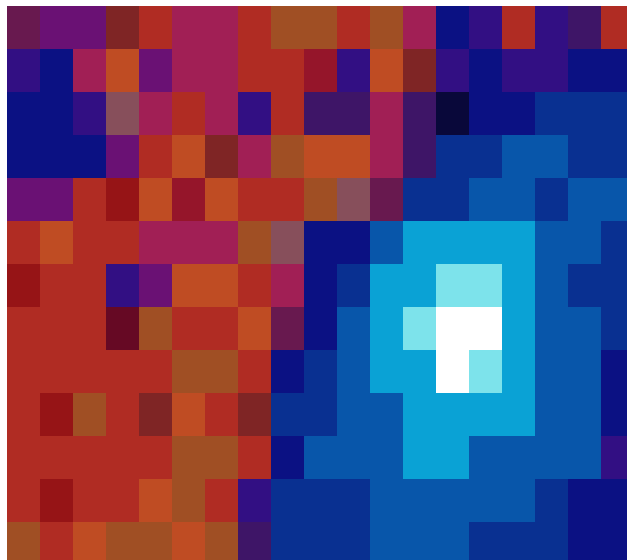
Ultravioleta
Figura 5.8



Rayos X
Figura 5.9



Combinación espectros visible y ultravioleta
Figura 5.10



Elementos mínimos de la representación:
Ampliación del cuadrado de la *Fig. 5.10*

Figura 5.11

5.4. Recapitulación

Ni la relación de isomorfismo, ni la de similaridad, tal y como se definen extensionalmente, por medio de la Teoría de Conjuntos, pueden constituir la base sobre la que se fundamente el carácter de la representación científica. *Las analogías, los parecidos, se dan entre representaciones, entre modelos, y no entre la representación y la realidad.* La naturaleza no tiene carácter de estructura algebraica: no es un conjunto con sus elementos y sus operaciones perfectamente definidos. Aunque parezca que la noción de similaridad es más débil, porque en principio sólo exige que el número de relaciones entre el modelo y la realidad sea el mismo, y permite que la cardinalidad de ambas estructuras sea distinta, esto no hace desaparecer los problemas básicos del isomorfismo o de cualquier otra correspondencia matemática que haga de la realidad un conjunto de elementos y una serie de operaciones sobre ellos. No puede haber una correspondencia entre elementos del modelo y elementos del mundo, si antes no existe una representación que abstraiga de la naturaleza los aspectos que interesan ser destacados. Las homotecias, semejanzas, aplicaciones, correspondencias o isomorfismos se dan entre estructuras algebraicas, y no tiene ningún sentido extrapolar estos conceptos matemáticos a la realidad tal como es en sí misma, si antes no interviene una proyección previa que abstraiga del mundo las dimensiones fundamentales físicas y las agrupe en una serie de objetos que actúan como sustratos lógicos dotados de ciertas propiedades. Pero con ello lo que hacemos es destacar del mundo su aspecto físico, para obtener lo que la Física considera que es su esencia. A partir de la medida *reconstruimos* la realidad allí hasta donde nos sea posible. El modelo que obtenemos es un *esquema básico de comportamiento* que no pretende explicar nada más que lo que se ha medido, es decir, que no se preocupa por otra cosa que no sea lo que previamente se ha destacado. No hay una única forma de esquematizar un fenómeno: sin perder información física, una serie de modelos puede apelar a distintas relaciones y objetos para que resulte más fácil el cálculo, por lo que los presupuestos básicos extensionales para caracterizar un fenómeno desaparecen. Ni la similaridad, ni el isomorfismo, recogen el significado de equivalencia física.

Porque, además, de modo mucho más importante, la similaridad supone que la realidad y la representación comparten algún aspecto en el que cabría decir que son iguales. Sin embargo, desde el punto de vista filosófico, está claro que la realidad y la representación no son cosas que puedan separarse para indicar en qué aspectos se pare-

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

cen y en cuáles no. No es posible establecer una relación de correspondencia porque no sabemos dónde se detiene la realidad, ni cuáles son sus límites. Lo que comparamos son las predicciones con las medidas, y no las estructuras. *El modelo no encaja en la realidad, ni siquiera más o menos, sino que es más o menos válido para subsumir una serie de medidas y establecer otra serie de predicciones.* En las fotografías que he mostrado lo único que aparece es una serie de medidas, que dependen de la intensidad de la luz y de la frecuencia registrada. Esta serie de medidas es ordenada y articulada por nosotros para formarnos una idea general del mundo, a partir de datos objetivos que en ningún caso ponemos en la realidad. Pero la medida tiene un límite, y no va más allá de cierto umbral de sensibilidad a partir del cual nada existe para el sensor. Siempre hay unos elementos mínimos, determinados por el grado de resolución y de precisión, a partir de los cuales nosotros elaboramos la representación. El modelo unifica racionalmente las medidas, pero esto no supone que hayamos copiado en algún aspecto la realidad, o que hayamos obtenido una estructura más o menos real de las cosas. *Lo único objetivo que podemos extraer de la realidad es una serie de medidas, nada más.* La representación nos da una regularidad en la naturaleza, pero es algo que suponemos nosotros previamente. A partir de esa presuposición metodológica, imaginamos o actuamos como si la naturaleza tuviera un orden, una proporción. Esta *ratio* entre propiedades es lo que nos muestra el modelo, y decimos entonces que tenemos la esencia de un fenómeno. Pero esta esencia no tiene por qué corresponderse con algo real: es *nuestra* esencia, la forma que hemos destacado a partir del original. Pero esta forma y el original, el mundo, son cosas de naturaleza completamente diferentes que no pueden compararse entre sí.

Las analogías, entonces, sólo tienen sentido entre representaciones, entre sistemas físicos, siempre dentro del contexto de descubrimiento, y nunca en el contexto de justificación. Una teoría no tiene por qué tener que especificar modelos más o menos visualizables o familiares. Las ecuaciones de campo de Einstein no tienen que especificar una serie de modelos que aclaren el contenido empírico de la teoría. Las teorías ya son empíricas por sí mismas, y no necesitan descender “empíricamente” porque ya se pronuncian sobre la realidad inmediatamente, aunque de momento no sea posible extraer todas las consecuencias observables. Pero las teorías ya resultan predictivas por sí mismas, porque se limitan a relacionar en una serie de ecuaciones cantidades físicas fundamentales que no obedecen a criterios distintos de los experimentales.

V. EL PAPEL DE LAS ANALOGÍAS EN FÍSICA

La teoría no puede incluir modelos análogos o aplicaciones, porque son cosas distintas. Que los modelos sean contruidos gracias a las teorías no significa que se confundan con ellas. Eso significaría que la serie de simplificaciones que los científicos utilizan como premisas para resolver problemas formaran parte de la teoría. Pero es imposible que todo el conjunto de simplificaciones y aproximaciones que la ciencia utiliza pueda ser axiomatizado dentro de la teoría.

Sin embargo, el uso de las analogías es fundamental en el *contexto de descubrimiento*, que forma parte esencial de la metodología científica, y no sólo constituye una guía heurística u orientativa hacia lo que tiene que ser investigado. La *analogía formal* entre ecuaciones, basada en la correspondencia entre signos y una estructura matemática idéntica, permite *unificar* el contenido empírico disperso entre varios campos de la ciencia, y obtener una *fórmula general* a partir de la cual seguir investigando, esto es, seguir prediciendo, puesto que una fórmula no sólo se limita a resumir datos conocidos, sino que va más allá y resulta aplicable, en principio, a otros ámbitos distintos. Que varios sistemas físicos obedezcan a una misma ecuación supone un beneficio enorme a la hora de resolver sus soluciones y poder aplicarlas a todos los sistemas mediante tablas de equivalencia.

Por último, he destacado que el uso de hipótesis provisionales a la hora de construir los modelos puede ser de máxima utilidad, a la hora, por ejemplo, de modelizar fenómenos para los que no se dispone de una teoría general. Un modelo puede tener una validez limitada a la espera de una justificación teórica, lo que sugiere que los modelos varían en nivel de abstracción y de fundamentación, según el error que arrastran sus premisas simplificativas.

CAPÍTULO VI

MODELOS SEMÁNTICOS

6.0. Introducción

Este capítulo es de especial importancia porque pretende una crítica definitiva a la distinción entre términos o entidades observables y puramente teóricas, así como continuar los argumentos del capítulo anterior contrarios a la relación de isomorfismo o similitud entre modelos y representación.

En la Sección 6.1: “Interpretaciones semánticas: Suppe”, recojo lo que a mi juicio constituye la mejor aportación de las visiones semánticas, a saber, la caracterización del fenómeno como un sistema ideal mediante parámetros y leyes que describen su secuencia ordenada de estados (*espacio-fase*). La trayectoria de un espacio n -dimensional, de acuerdo a los parámetros considerados relevantes, permite calcular las magnitudes seleccionadas y comprobar hasta qué punto el sistema representativo se adapta a los resultados experimentales. También coincido con estos análisis en que las hipótesis auxiliares y los factores de corrección, que permiten imponer configuraciones más simples al espacio-fase, con el fin de experimentar y calcular, no forman parte de las teorías. Discuto, sin embargo, la pretensión de que estos sistemas puedan llegar a ser isomórficos o icónicos respecto de la realidad misma, o de que sean copias abstractas que simulen los sistemas de la naturaleza. En general, me opongo a considerar las teorías o los modelos como entidades extralingüísticas.

La Sección 6.2: El empirismo constructivo de van Fraassen”, constituye un análisis crítico de las aportaciones de van Fraassen a la epistemología científica. Las tesis principales que me interesan son: 1) la postulación teórica de entidades no accesibles a la observación; 2) el compromiso con las virtudes puramente empíricas de las teorías, frente a otro tipo de virtudes pragmáticas o explicativas; y 3) la exigencia de que las

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

apariencias sean isomórficas con las subestructuras empíricas de los modelos, en caso de éstos “salven las apariencias”. Además de lo expresado en el apartado anterior, coincido con van Fraassen en la exigencia metodológica de intentar unificar los modelos teóricos o “miniteorías” en una teoría más amplia, y en el papel de la experimentación como prolongación de la actividad teórica.

La Subsección 6.2.1: “Crítica de la distinción teórico-observable” considera uno de los dos errores básicos que a mi juicio comete el “empirismo constructivo”, como es el de creer que la ciencia designa como “inobservables” determinadas partes dentro de sus teorías. Defiendo que no se ha proporcionado ningún criterio decisivo que permitiera distinguir entre lo observable y lo puramente teórico: la división no aparece en ningún texto científico, y todos los objetos son tratados, dentro de la Física, exactamente de la misma manera y por el mismo procedimiento, ya sean mesas, electrones o quarks. Tras un análisis de la noción de “observabilidad”, me opongo a que la Física o la Biología “últimas” puedan pronunciarse sobre lo observable y lo no observable, y asimilo la observabilidad a lo experimentable y detectable, no existiendo mayor fiabilidad en un ojo humano que en un microscopio, ni en el sentido de la vista más que en el del tacto, por ejemplo. También me opongo a que los límites de la observabilidad sean nuestras limitaciones *qua* seres humanos, y a la división del Universo en reinos ontológicos donde rigieran diferentes teorías en virtud de su utilidad “práctica”.

La Subsección 6.2.2: “Crítica del isomorfismo (II)”, muestra, con ayuda de un modelo de caída libre, cómo es imposible hablar de correspondencia exacta entre la representación y la realidad, aun en los casos relativamente más sencillos, y cómo *el modelo hace mucho más que resumir la información disponible*, permitiendo el cálculo de nuevas predicciones que la ciencia, en su caso, comprobará posteriormente. Nuestras medidas operan *discretamente* sobre la realidad, y la representación presupone una continuidad de la que la naturaleza, por sí sola, carece. Reflexiono después sobre el progreso teórico, al que ligo indisolublemente al progreso empírico, entendido como un *aumento en el detalle* que permitirá precisar después las leyes fundamentales y, en su caso, *reinterpretarlas*.

En la Sección 6.3: “Modelos cognitivos de Giere”, analizo las posiciones fundamentales de su “realismo constructivo” con objeto de criticar posteriormente la pretensión de exista alguna similaridad entre determinados aspectos de los modelos y del mundo. Coincido con Giere en su rechazo del isomorfismo, pues nunca existe una co-

VI. MODELOS SEMÁNTICOS

rrespondencia total entre mundo y representación, en los diferentes grados de abstracción de los modelos, en su rechazo de la distinción teórico-observable y en la revisión de los modelos, que nunca quedan refutados al primer desajuste entre predicciones y observaciones. Sin embargo, discrepo en la poca relevancia que concede a las leyes científicas a la hora de modelizar los fenómenos, y en su pretensión de que las teorías incluyan las “hipótesis teóricas” o grados de similaridad entre sus modelos y los sistemas reales. Defiendo que hay leyes más *precisas* y *justificadas* que otras, así como la *jerarquización* de los modelos basada en su nivel de *fundamentación*: precisamente porque los modelos pueden mejorarse, hay un orden de *prioridades* a la hora de rechazar y conservar enunciados. La decisión de un científico sobre qué ecuaciones retiene frente a las demás es una cuestión de *fiabilidad*, donde no todas las hipótesis y leyes yacen al mismo nivel.

La Sección 6.4: “Crítica de la similaridad”, constituye mi último ataque a la noción de similaridad, a la que directamente caracterizo como un *isomorfismo camuflado*. A partir de un experimento mental, analizo los fundamentos de la modelización, comenzando por una serie de medidas aceptadas como verdaderas, para las que se busca un modelo de datos y una fundamentación teórica. El ejemplo pone claramente de manifiesto que *en un conjunto de datos no hay ningún sistema, ninguna forma, ninguna regularidad*, y que eso es algo que ponemos nosotros en la representación, buscando una fórmula matemática que nos permita *subsumir las medidas* consideradas verdaderas y al mismo tiempo establecer una serie de *predicciones* que puedan comprobarse posteriormente. El modelo y la realidad no se parecen en nada porque no hay nada que comparar: la realidad no es un sistema, y en *lo único en lo que se “parecen” es en la serie de datos que el modelo genera más o menos satisfactoriamente*. La comparación, concluyo, tiene lugar únicamente en la medida, y la similaridad supone un isomorfismo de cierta tolerancia, de cierto error permitido, al que nos iríamos aproximando sucesivamente y con un acierto cada vez mayor.

6.1. Interpretaciones semánticas: Suppe

También Suppe (1990) se opone a Nagel en la utilización de términos visualizables o conceptuales más familiares. Respecto a la consideración de Campbell, Nagel, y Hesse,

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

de que sin los modelos icónicos no es posible dar explicaciones, señala (*op. cit.*, pp. 156 y ss):

En primer lugar, si predicción y explicación son en esencia la misma operación (como Hempel y otros defensores del modelo de la ley de cobertura pretenden), entonces es probable que el argumento no sea válido. En segundo lugar, si explicación y predicción no son la misma cosa, entonces sus ideas son relativas a una interpretación de la explicación que no han ofrecido ni defendido adecuadamente. En tercer lugar, si explicación se entiende en un sentido más fuerte que aquel según el cual explicación y predicción se identifican, no está en modo alguno claro que las teorías científicas tengan que dar explicaciones (y tal vez ocurra que la teoría cuántica no lo haga).

Sin embargo, Suppe considera que el análisis de Hesse aclara algunas cuestiones acerca de las posibles interpretaciones parciales del lenguaje teórico L_t de una teoría TC (teoría más reglas de correspondencia). Para dar un contenido empírico a las leyes teóricas, la ciencia normalmente utiliza otras teorías distintas, así como ciertas asociaciones con otras ramas de la ciencia, que pueden incluir modelos icónicos, como en el uso de la palabra “partícula”, que se relaciona con la teoría clásica de Newton, o cuando la teoría Cuántica reelabora los modelos de ondas y corpúsculos para definir nuevamente su significado. Los modelos tienen entonces una importancia considerable a la hora de interpretar el contenido no observable de la teoría. Además, una teoría, cuando es formulada matemáticamente, admite una interpretación matemática que la pone en correspondencia con la realidad; afirmar la teoría es afirmar entonces que existe un isomorfismo entre la realidad y lo que se describe en el modelo, una identidad de forma, tal que la representación resulta ser una especie de modelo icónico de la realidad. Como ejemplo, Suppe (*ibid.*, p. 160) propone la interpretación matemática de las leyes de la Mecánica Clásica, que representa un sistema de puntos sobre los que sitúan ciertas propiedades y funciones: hay una semejanza de estructura entre lo descrito matemáticamente y la parte no observable del mundo que se considera.

Ya que para Suppe las reglas de correspondencia C no se pueden concebir como definiciones de los términos teóricos, su misión principal sería especificar los procedimientos experimentales mediante los que la teoría se aplica a un conjunto de fenómenos, así como el tipo de relación o correspondencia que se da entre la teoría y los fenómenos observables. Pero incluso en esta versión, las reglas de correspondencia no representarían adecuadamente las relaciones entre la teoría y los fenómenos, ni las aplicacio-

VI. MODELOS SEMÁNTICOS

nes experimentales. Además, cualquier cambio de C sería un cambio de teoría, cuando en realidad lo único que ha sucedido, según Suppe (*ibíd.*, p. 162), es que “ahora sabemos más sobre cómo aplicarla a los fenómenos”.

En el fondo de estos errores, está la consideración de que las reglas de correspondencia forman parte de la teoría. Como dice Suppe, las reglas de correspondencia no deben incluirse dentro de la teoría: más bien son *hipótesis auxiliares* que aplican la teoría a los fenómenos. La teoría T debe ser identificada con su interpretación semántica, y las reglas C no serían más que hipótesis que limitan el contenido observacional de L_t , de las leyes teóricas. De hecho, para Suppe, en la presentación de una teoría, rara vez se especifica el conjunto de procedimientos experimentales que interpreten el significado de los términos; más bien se presentan los postulados teóricos y sus interpretaciones. Otra razón para no incluir C dentro de la teoría T es que los procedimientos experimentales son ilimitados, y no estamos justificados a creer que puedan ofrecerse alguna vez todas las aplicaciones mediante las reglas de correspondencia.

En este sentido, Patrick Suppes (1967) opina que la teoría se relaciona con la experiencia de modo mucho más complejo que lo que supone el positivismo lógico. Las teorías se verifican con la ayuda de toda una jerarquía de teorías que incluye, en lo más alto, la teoría física misma, mientras que el resto se forma de funciones continuas o secuencias infinitas. La teoría del experimento determina las combinaciones posibles de los resultados experimentales. Dadas las ecuaciones de una teoría, que describen el comportamiento de un sistema general, la teoría del experimento especifica cuáles son los sistemas relevantes; por ejemplo, si la teoría es la Mecánica Clásica, y el experimento consiste en averiguar el valor de la velocidad final a la que cae una bola sobre un plano de inclinación α , las secuencias de estado de sistemas de planos inclinados son escogidas a partir de las ecuaciones de las leyes, si la teoría es considerada verdadera. Las condiciones experimentales no especificadas serán las cláusulas *ceteris paribus*. Los datos recogidos corresponderán a situaciones reales donde interviene la fuerza de rozamiento, y para ser aplicados a modelos donde no interviene la fricción deberán ser transformados mediante la teoría en variables experimentales. Por último, el mayor o menor ajuste se realiza estadísticamente.

De este análisis de la complejidad de las reglas de correspondencia, y de otras dificultades de la formulación canónica de la teoría en el positivismo lógico, como la distinción analítica y sintética, u observable e inobservable, Suppe (*ibíd.*, p. 177) mantiene

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

que las teorías no pueden ser definidas sintácticamente, sino semánticamente; no por medio de un cálculo axiomático, sino mediante las técnicas de la Teoría de Modelos, interpretando un lenguaje L en términos de la estructura matemática e identificando entonces la teoría con la clase de enunciados de L verdaderos bajo esta interpretación¹³⁰.

Las teorías son entidades extralingüísticas que se pueden describir por medio de sus formulaciones lingüísticas. Las proposiciones que aparecen en la formulación de una teoría ofrecen, pues, descripciones verdaderas de la misma y, de este modo, la teoría es como un modelo de cada una de sus formulaciones.¹³¹

Este enfoque se opone tanto al positivismo lógico como a determinados análisis *weltanschauungísticos* que se basan en una concepción enunciativa de las teorías. En vez de considerar a las teorías como una colección de enunciados, los estudios semánticos consideran que las teorías son entidades extralingüísticas que pueden ser caracterizadas por distintas formulaciones. Por ejemplo, la mecánica ondulatoria y la mecánica matricial, según la demostración de Von Neumann, serían formulaciones equivalentes de la Teoría Cuántica.

La teoría no se identifica con una serie de enunciados. TC designa la teoría, pero sólo es una manera de formularla. Si TC es “empíricamente verdadera”¹³², describe el mundo real y la teoría, con lo que tendrá dos modelos matemáticos. Ya que TC, los enunciados, describen una parte del mundo, siendo un modelo icónico suyo, el mundo y la teoría serán también modelos icónicos.

La teoría científica tiene un alcance determinado, dentro del cual describe, predice y explica parte de los aspectos observables de los fenómenos; para ello abstrae del mundo los parámetros que considera relevantes para su comportamiento observable, y describe los fenómenos en función de esos parámetros. Se supone i) que los parámetros son suficientes para la sistematización del fenómeno en cuestión, y que al margen de ellos no hay otros parámetros que los influyan; ii) que los sistemas son entes relativamente aislados, sujetos al comportamiento de estos parámetros. Ahora bien, no hay sistemas

¹³⁰ Este enfoque no pasaría por alto la llamada “lógica del descubrimiento”, tan importante para los análisis basados en el *Lebenswelt*: sería posible una teoría adaptiva que hiciera justicia a la dinámica de la ciencia, por medio de la formalización semántica.

¹³¹ Cf. Suppe (*ibid.*, p. 334).

¹³² Cf. Suppe (*ibid.*, p. 159, nota)

VI. MODELOS SEMÁNTICOS

perfectamente aislados, aunque las condiciones en las que se realiza los experimentos y las observaciones tratan de acercarse, en la medida en que el margen de error se lo permite, a este ideal de aislamiento.

Lo importante dentro de esta concepción semántica es que la teoría caracteriza a los sistemas *idealmente*, sin que pretenda dar una descripción real de los fenómenos.

Sin embargo, si la teoría es adecuada, ofrecerá una caracterización exacta de cómo *hubiera sido* el fenómeno de haber sido un sistema aislado¹³³.

La teoría caracteriza sistemas que en realidad son *copias abstractas* de los fenómenos, simulaciones de su comportamiento ideal. La medición simultánea de los parámetros que describen el sistema será una configuración concreta, un *estado*, representado por un conjunto de n -tuplos números. La representación completa del sistema describe el cambio de estados en el tiempo. Así, el sistema es caracterizado mediante la trayectoria en el espacio n -dimensional de estas coordenadas. La representación del fenómeno consiste en la *secuencia ordenada de estados*.

Suppe (*ibíd.*, pp. 338-339) pone el ejemplo de un cuerpo que cae libremente en un fluido viscoso. Para la caracterización de los fenómenos, la Mecánica Clásica emplea sistemas aislados de masas puntuales inextensas en el vacío; en este caso, el sistema estaría formado por las masas de la Tierra y del cuerpo, y los parámetros serían las doce coordenadas de la posición y el momento. El comportamiento de este sistema sería el conjunto de estados descritos por estos parámetros, la curva continua en el espacio que adopta el sistema físico¹³⁴. Si se conoce el estado de un sistema físico en el instante t , puede determinarse un instante posterior t' . Para ello medimos experimentalmente el momento y la posición del cuerpo que cae; como enunciados de observación aceptados consideramos la densidad del medio viscoso y la masa de la Tierra. Ya que el sistema es un ideal, hay que emplear hipótesis auxiliares, factores de corrección, etc.; todo con el fin de representar numéricamente los sucesivos estados que adopta el sistema. Las leyes nos permiten calcular los valores de los parámetros en el instante seleccionado t' .

¹³³ *Op. cit.*, p. 337.

¹³⁴ Este espacio es, para Suppe, el *espacio-fase*, mientras que para van Fraassen constituye el *espacio-estado*.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Si la teoría es correcta, existe un acuerdo (dentro de los límites de error experimental) con los valores que se hubieran obtenido si se hubieran realizado medidas en el fenómeno en el instante t' .

Las leyes de la teoría imponen configuraciones al espacio-fase, especificando el comportamiento de los sistemas físicos. Entre los tipos de leyes, se encuentran las deterministas y las estadísticas; una segunda clasificación se puede establecer entre leyes de coexistencia, de sucesión y de interacción. “ $PV = nRT$ ” sería una ley determinista de coexistencia, porque establece qué puntos del espacio-fase son físicamente posibles, justamente aquellos que satisfagan la ecuación, y selecciona entre todas las posibles coordenadas un subconjunto con sentido físico. Las leyes de la Mecánica Clásica serían leyes deterministas de sucesión, mientras que la hipótesis de Boltzman especificaría que cada estado del gas tiene la misma probabilidad de realizarse, por lo que sería una ley estadística de coexistencia. Las cadenas finitas de Markov, en las ciencias sociales, serían ejemplos de leyes estadísticas de sucesión, que describen matrices de probabilidad en cada transición del espacio-fase. En general, las teorías son estructuras de espacios cuya configuración es impuesta por las leyes.

Hasta aquí, y sin entrar en la problemática del isomorfismo, el análisis semántico constituye una verdadera alternativa a los enfoques sintácticos del positivismo lógico. Entre las virtudes de esta concepción se encuentran, a mi juicio, las siguientes:

1) La teoría caracteriza al fenómeno mediante lo que Suppe llama “parámetros”, pero que yo prefiero denominar *indicadores*, porque describen o indican cuál es el estado del sistema en cuestión en un momento dado t . El sistema es dividido, si es preciso, en subsistemas, los cuales se caracterizan por esos mismos indicadores y por una serie de condiciones que los ligan entre sí, debido a las influencias recíprocas.

2) Los indicadores, como la masa, el peso, la carga, son aspectos físicos del fenómeno que representan, y su objetividad es asegurada mediante el *análisis dimensional*. Hay, pues, una base neutral de observación, que es interpretada de acuerdo con la teoría que modeliza el fenómeno.

VI. MODELOS SEMÁNTICOS

3) Diferentes teorías significan diferentes leyes, lo cual supone distintas configuraciones para el fenómeno. Las magnitudes se relacionan mediante ecuaciones, las cuales constituyen leyes. Una ley es un algoritmo que relaciona variables físicas. La ley devuelve, como en los modelos astronómicos, un resultado para cada entrada del sistema. Una ley es un modelo matemático que, efectivamente, dado el estado de un sistema físico en el instante t , determina el estado de los indicadores en un instante posterior t' .

4) Predicción, descripción y explicación, como en el positivismo lógico, son parte fundamental del mismo proceso de modelización, y, desde el punto de vista de una ecuación, no se distinguen entre sí. (Sin embargo, dentro de la explicación, podemos distinguir diferentes grados de fundamentación y justificación teórica, con el fin de diferenciar entre “salvar las apariencias” y “explicar deductivamente”, a partir de principios teóricos generales aceptados como verdaderos.)

5) En general, el fenómeno es descrito idealmente mediante una trayectoria en un espacio n -dimensional de las coordenadas relevantes. Esta *secuencia ordenada de estados*, que describe el espacio-fase, es lo que permite distinguir entre las teorías físicas, en el sentido, por ejemplo, de que lo que en unas se permite en otras puede estar prohibido. Los distintos estados permitidos del sistema se obtienen matemáticamente a partir de una serie de leyes que configuran idealmente el fenómeno y permiten obtener estados del sistema (predicciones) a partir de otros estados conocidos.

6) Las hipótesis auxiliares y los factores de corrección se sitúan *fuera* de las teorías, y no es posible especificar todas las condiciones, aproximaciones y simplificaciones dentro de sus ecuaciones fundamentales.

7) La validez o corrección de una teoría es el *mayor o menor acuerdo* relativo entre enunciados de predicción y enunciados de observación, entre los valores que el modelo arroja para un instante determinado t' y las medidas efectivas realizadas en ese mismo instante.

Considero que estas razones subrayan convenientemente el acierto de la visión semántica a la hora de considerar metodológicamente el contenido de las teorías físicas.

Ahora bien, se puede defender todos estos puntos sin creer que las teorías son copias abstractas de los fenómenos, ni que haya un isomorfismo entre estructuras ideales y estructuras reales del mundo. Como ya he señalado en los capítulos anteriores, el problema está en considerar que la teoría puede ser definida extensionalmente a partir de la Teoría de Conjuntos, mediante la interpretación de un lenguaje formal. En los apartados que siguen, criticaré por segunda vez la idea de que exista cualquier tipo de correspondencia entre realidad y modelo, aunque estas relaciones correspondan a estructuras supuestamente observables del mundo. A través de la filosofía de van Fraassen mostraré que, en último término, las teorías sólo especifican estructuras empíricas, sin que existan componentes “no observables” dentro de las entidades que postulan.

6.2. El empirismo constructivo de van Fraassen

Según van Fraassen (1996, p. 24) el realismo piensa 1) que la ciencia se propone darnos, en sus teorías, un relato literalmente verdadero de cómo es el mundo (tiene la intención, no que de hecho lo consiga); y 2) que la aceptación de una teoría científica supone la creencia de que es verdadera¹³⁵. Ahora bien, la teoría postula estructuras no accesibles a la observación (cf. *ibid.*, p. 17). Siguiendo las directrices empiristas, van Fraassen piensa que la estructura postulada es un medio para el fin: artificios para facilitar lo que realmente ocurre. Esto implica suspensión de creencia, agnosticismo, para la parte teórica que no se corresponda con los fenómenos observables. Así (cf. *op. cit.*, p. 108), “la inmersión en la imagen teórica del mundo no impide “poner entre corchetes” sus implicaciones ontológicas.”

El empirismo constructivo que van Fraassen defiende no se preocupa de la verdad respecto de lo inobservable, y piensa que la tarea de la ciencia es construir modelos adecuados a los fenómenos:

La creencia involucrada al aceptar una teoría científica es meramente que ella “salva los fenómenos”, es decir, que describe correctamente lo que es observable. Pero la aceptación no es sólo creencia [...] Aun si dos teorías son equivalentes empíricamente, y la aceptación de una teoría involucra sólo la creencia en su adecuación empírica, puede todavía haber una gran diferencia en cuál de ellas aceptar. La

¹³⁵ Véase también 1990, pp. 190 y ss.

VI. MODELOS SEMÁNTICOS

diferencia es pragmática, y [...] las virtudes pragmáticas no nos dan ninguna razón, por encima de la evidencia de los datos empíricos, para pensar que una teoría es verdadera.”¹³⁶

Frente a las aspiraciones del realista de considerar que la totalidad de la teoría es verdadera a partir de sus consecuencias observables, el antirrealista simplemente despliega la teoría, y dice si es adecuada o aceptable. Las virtudes empíricas de una teoría como la fuerza empírica o la adecuación, no tienen que derivarse necesariamente de su verdad, de forma que el compromiso con una teoría no significa que sea verdadera, sino sólo adecuada empíricamente.

Van Fraassen (1996, p. 30) considera que, a diferencia del positivismo lógico, donde la distinción entre observable e inobservable residía en el vocabulario de la teoría, los términos son todos teóricos (útiles para la construcción de teorías), mientras que los entes que describen son observables o inobservables. En este sentido, el lenguaje de la ciencia está “completamente infectado de teoría”: conceptos como “masa”, “elemento”, o “receptor VHF”, nos indican que el lenguaje se guía por las imágenes de teorías aceptadas con anterioridad. La diferencia no está en el vocabulario, puesto que el valor empírico de una teoría no puede aislarse sintácticamente. Las reconstrucciones positivistas del lenguaje son claramente inoperantes, y ni siquiera (cf. *ibid.*, p. 80) nos ayudarían a separar la información que la teoría nos da acerca de lo que es observable.

Por el contrario, para van Fraassen, aunque el predicado “observable” sea fundamentalmente vago, lo observable es una cuestión empírica, independiente de la teoría, y depende de nosotros como organismos. Más aún, la ciencia misma (*ibid.*, p. 81) muestra con claridad sus límites en relación con lo observable. De toda la imagen que la ciencia nos muestra de la realidad, solamente hay ciertas partes que son observables, justo allí donde puede comprobarse efectivamente la correspondencia. Otros criterios, como la simplicidad o la consistencia interna, pertenecen a la teoría en sí, o son de orden pragmático, en el sentido de referirse a preocupaciones humanas.

Pero, ¿cuál es el criterio que nos permite separar la parte observable de la inobservable? “Un caballo volador es observable -ésta es la razón por la que estamos tan seguros de que no hay ninguno”, dice van Fraassen. “Un acto espontáneo de percepción es una observación. Un cálculo de la masa de una partícula a partir de la desviación de su trayectoria en un campo de fuerza conocido, no es una observación de esa masa”.

¹³⁶ Cf., *op. cit.*, pp. 18 y 19.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Igualmente, las lunas de Júpiter son observables, ya que los astronautas podrían verlas desde cerca. También la existencia de un avión puede inferirse a partir de su estela. Sin embargo, la “observación” de micropartículas es diferente: aquí es la teoría quien dice que los átomos próximos a la trayectoria son ionizados, cuando la partícula cargada atraviesa una cámara de vapor saturado que se descomprime condensando gotas sobre los iones.

Van Fraassen prefiere permanecer agnóstico sobre la existencia de entidades teóricas no observables postuladas por la ciencia. El predicado “observable” dependería de a) la evidencia disponible; y b) nuestros límites perceptivos, lo que le daría cierto matiz antropocéntrico. Así, (1996, p. 34):

Si tengo un mortero y una mano hechos de cobre y que pesan cerca de un kilo, ¿debería llamarlos rompibles porque un gigante podría romperlos? ¿Podría llamar portátil al edificio Empire State? ¿No hay distinción entre una grabadora portátil y una de consola? El organismo humano es, desde tal punto de vista de la física, cierto tipo de aparato de mediciones. Como tal, tiene ciertas limitaciones inherentes, que serán descritas en detalle por la física y la biología últimas. Son estas limitaciones a las que el “able” en “observable” se refiere: nuestras limitaciones *qua* seres humanos.

La creencia del realista en una teoría significa la creencia de que las entidades postuladas existen. Para el empirista constructivo, en cambio, aceptar una teoría significa creer que lo que dice la teoría acerca de lo observable es verdadero¹³⁷. Así, la teoría puede ser correcta respecto a lo observable e incorrecta en lo inobservable. Por ejemplo, la Mecánica Clásica tiene como observables básicos la posición y el tiempo, mientras que la masa no es definible en términos de los observables básicos. Por otra parte, hay determinados entes que serían candidatos a formar parte de los inobservables, pero que la ciencia ha acabado observando, como ciertas moléculas que cristalizan en estructuras visibles. Con relación a esto (1996, p. 82):

Si una teoría clasifica un cristal o una mesa como un ente descrito teóricamente, ¿constituye la presencia de ese objeto observable una prueba de la presencia de la realidad de otros entes, diferentes pero clasificados de manera similar?

¹³⁷ *Ibid.*, p. 35.

VI. MODELOS SEMÁNTICOS

En definitiva, ya que las teorías complejas tienen siempre cierto “bagaje metafísico” (cf., *op. cit.*, pp. 93 y 94), y utilizan variables teóricas para dar “rodeos” antes de conseguir descripciones útiles de los fenómenos, una cosa es aceptar la teoría y otra creer en ella.

Creer en una teoría es creer que uno de sus modelos representa correctamente el mundo. Podemos concebir los modelos como si representaran los mundos posibles de la teoría; uno de los cuales sería el mundo real. Creer en la teoría es creer que exactamente uno de esos modelos representa correctamente el mundo (no sólo hasta cierto punto, sino en todos los aspectos).¹³⁸

Desde este enfoque semántico, la teoría se identifica con la clase de sus modelos. Una misma estructura puede entonces definirse de maneras distintas. Los llamados “axiomas” de la Mecánica Cuántica serían más bien una descripción de los modelos de la teoría que especifican subestructuras empíricas.¹³⁹ El contenido empírico de una teoría (1990, p. 227) se identifica con un conjunto de oraciones, expresada en cierto vocabulario observacional. Ésta es la parte de la teoría donde sus modelos se identifican con subestructuras empíricas (*data model*, en el vocabulario de Suppes), donde el grado de representación de los fenómenos puede constatarse en la experiencia.

Para que una teoría sea adecuada empíricamente todas las “apariencias” deben ser isomórficas con subestructuras empíricas:

Presentar una teoría es especificar una familia de estructuras, sus modelos; y en segundo lugar, especificar ciertas partes de esos modelos (las subestructuras empíricas) como candidatos para la representación directa de fenómenos observables. Podemos llamar apariencias a las estructuras que pueden describirse en los informes experimentales y de medición. La teoría es empíricamente adecuada si tiene algún modelo tal que todas las apariencias son isomórficas con las subestructuras empíricas de ese modelo.¹⁴⁰

Si para cada modelo M de una teoría T hay un modelo M' de otra teoría T' tal que todas las subestructuras empíricas de M son isomórficas con las estructuras empíricas de M', entonces T es empíricamente tan fuerte como T'.¹⁴¹ Si dos teorías con axiomas

¹³⁸ *Ibid.*, p. 70.

¹³⁹ *Ibid.*, p. 91.

¹⁴⁰ *Ibid.* p. 89.

¹⁴¹ *Ibid.*, p. 93.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

diferentes tienen los mismos teoremas y modelos, y especifican del mismo modo las estructuras empíricas, no diferirán en su valor empírico. Las superioridades pragmáticas, en este caso, no tendrían importancia con relación a lo observable.

Para el antirrealista, señala van Fraassen (*ibíd.*, p. 50), la investigación científica se orienta hacia un mejor conocimiento de lo que es observable. No tenemos por qué creer en aquellas explicaciones que buscan las variables físicas fuera de lo observable, a partir, por ejemplo, de microestructuras teóricas que no podemos observar. La exigencia ilimitada de explicación, en este sentido (cf. *ibíd.*, p. 41), “conduce a una demanda de variables ocultas”, mientras que el verdadero objetivo de la ciencia (cf. *ibíd.*, p. 54) no es explicar en sentido estricto, sino desplegar “cuadros imaginativos” para sugerir y corregir los enunciados acerca de regularidades observables.

Desde este punto de vista empirista, la construcción de teorías no puede ser la actividad científica suprema, puesto que no sólo responde a los fenómenos observables¹⁴². La ciencia es un fenómeno biológico, una actividad que facilita la interacción de un tipo de organismo con el ambiente. Para el científico, lo importante es la experimentación, no conocer la estructura del mundo. Para descubrir las regularidades de la parte observable del mundo, se requiere experimentar, “en oposición a la razón y a la reflexión”¹⁴³. Pero las regularidades son complejas, y el diseño experimental es complicado: de ahí la necesidad de construir teorías.

Casos como el de Millikan a la hora de medir la carga del electrón, sugieren que la construcción teórica consiste en experimentar, y que al mismo tiempo “la experimentación es la continuación de la construcción teórica por otros medios”¹⁴⁴. El fin que se pretende es la adecuación empírica, y cuando faltan los beneficios empíricos, la ciencia no valora excesivamente la explicación¹⁴⁵.

Más aún (cf. *ibíd.*, p. 126), si la teoría explica un hecho, de ahí no se sigue que sea verdadera, ni empíricamente adecuada, ni aceptable: Lorentz explicó el retraso de los relojes, Newton las mareas, Huygens la difracción de la luz, Bohr el espectro de hidró-

¹⁴² Véase 1990, p. 213. “Scientific models may, without detriment to their function, contain much structure which corresponds to no elements of reality at all”.

¹⁴³ *Ibid.*, p. 90.

¹⁴⁴ *Ibid.*, p. 103. Véase también 1990, pp. 230-232, donde se dice que experimentar es continuar la teoría por otros medios: “experimentar es construir, más que descubrir”.

¹⁴⁵ *Ibid.*, p. 54.

VI. MODELOS SEMÁNTICOS

geno. “Incluso si dos teorías son estrictamente equivalentes empíricamente, pueden diferir en que una puede ser utilizada para contestar cierta petición de explicación, mientras que la otra no”¹⁴⁶. La ciencia busca explicaciones por cuanto que busca teorías empíricamente adecuadas y empíricamente fuertes.

Si uno cree que T y T' son ambas verdaderas, entonces seguramente (so pena de inconsistencia) cree que su conjunción es verdadera. Pero si T y T' son teorías empíricamente adecuadas, su conjunción no necesariamente tiene que serlo; ésta incluso puede ser inconsistente. Dos teorías rivales que ofrecen relatos incompatibles de procesos inobservables pueden ser, en principio, cada una empíricamente adecuadas.¹⁴⁷

Frente al último argumento realista de que las teorías aceptadas son aproximadamente verdaderas, no porque sean verdades necesarias, sino como parte de la única explicación del éxito de la ciencia, al que no convierte en un milagro, van Fraassen insiste en que los datos empíricos no garantizan la verdad; las teorías pueden salvar las apariencias y diferir en el valor de verdad¹⁴⁸. Un realista tendrá que dar un salto de fe, pero esta decisión no la dictan la razón ni la evidencia. En todo caso, las virtudes pragmáticas ofrecen razones para preferir la teoría, con independencia de su verdad.

6.2.1. Crítica de la distinción teórico-observable

Sinceramente, no creo que el análisis que he presentado de van Fraassen ayude a comprender la naturaleza de la representación científica. Sus limitaciones son graves, especialmente en lo que se refiere a otra “nueva” distinción entre lo teórico y lo observable, ahora bautizada como “observable” e “inobservable”, o la creencia de que las teorías, en algún momento, sean capaces de proporcionar subestructuras empíricas “isomórficas” con las apariencias.

Por lo que a mí respecta, coincido solamente con van Fraassen en dos ideas puntuales, que considero que no desarrolla convenientemente, pero que al menos están cla-

¹⁴⁶ *Ibid.*, p. 190.

¹⁴⁷ *Ibid.*, p. 110.

¹⁴⁸ *Ibid.*, p. 57.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

ramente expresadas. Estas dos temas en los que estoy de acuerdo son, justamente, aquellos que la mayor parte de la filosofía actual de la ciencia consideraría equivocados.

La primera de ellas está expresada en Van Fraassen (1996, p. 114):

No hay duda de que la meta de la adecuación empírica exige ya la unificación sucesiva de “miniteorías” dentro de las teorías mayores, y que el proceso de unificación es principalmente un proceso de corrección y no de conjunción”.

Es decir, no se trata de sumar hechos. Se trata de sistematizarlos en unidades más amplias. Si la palabra “modelo teórico” se aplica para describir los procedimientos que se usan a falta de una teoría fundamental capaz de recoger todo el material empírico de que se dispone, es obvio que una de las metas de la ciencia es que tales modelos teóricos desaparezcan. Se investiga para que así ocurra; otra cosa es que se logre o no se logre. Eso depende del talento científico de una época y de la naturaleza del fenómeno en cuestión. Pero, como desarrollaré convenientemente en el Cap. VIII, a la hora de hablar de los modelos de la Física Nuclear, lo que se pretende es que tales “miniteorías” desaparezcan a favor de otras teorías más comprensivas, cuyo alcance no sólo se limite a “salvar las apariencias”.¹⁴⁹

La segunda tesis con la que coincido con van Fraassen hace referencia a la relación entre teoría y experimentación. Ya he señalado un poco más arriba que en van Fraassen (1996, p. 103) se afirma:

La experimentación es la continuación de la construcción teórica por otros medios.

Y en 1990, pp. 230-232:

Experimentar es construir, más que descubrir.

¹⁴⁹ Otra cuestión distinta es creer que tales “miniteorías” siempre vayan a existir. Ya que surgen cuestiones nuevas, un primer enfoque generalmente requiere el uso de modelos teóricos mediante hipótesis provisionales. Como una de las partes fundamentales del proceso racional científico, además de la justificación, es la investigación, los modelos teóricos “fenomenológicos” (o de bajo nivel) siempre existirán. Pero, presumiblemente, no serán siempre los mismos.

VI. MODELOS SEMÁNTICOS

Esto no quiere decir solamente que la observación esté “cargada de teoría”, sino que las relaciones entre teoría y experimento son mucho más profundas de lo que podemos deducir leyendo ciertos textos. Experimentar, al fin y al cabo, significa desarrollar una propuesta, probarla (*test*); pero esa apuesta por un determinado resultado experimental tiene que basarse en alguna proposición teórica, sin importar en que nivel se sitúe. No todos los experimentos son igual de ambiciosos, igual que no toda la teoría yace en el mismo nivel. Igual que hay una jerarquía de leyes, afirmo que existe una *jerarquía experimental*, dependiendo de las implicaciones teóricas del experimento. No puede trazarse una línea entre “experimentar” y “teorizar”, como si fueran dos cosas distintas. En esencia, son parte del mismo proceso, y una cosa no puede darse sin la otra.

Esta afirmación está claramente en contra de lo expresado por Hacking (1996) y Cartwright (1991). En el capítulo en el que los analizo críticamente (Cap. VII) me ocuparé más despacio del tema. Sólo quiero señalar, por ahora, que quienes están de acuerdo con lo fundamental de la filosofía de van Fraassen es natural que renieguen de estas dos tesis que yo considero acertadas, ya que no se ve muy bien cómo podrían casar con el resto de sus ideas principales, especialmente en lo que se refiere al isomorfismo y a la división entre lo observable y lo inobservable.

Pero comencemos con esta última distinción. Ni Carnap ni Hempel pudieron ofrecernos nunca una línea de demarcación entre términos teóricos y términos observacionales¹⁵⁰. Ahora van Fraassen rechaza la posibilidad de dividir “sintácticamente” el vocabulario de una teoría entre lo teórico y lo observacional, entre otras cosas, porque -afirma- ni siquiera ayudaría a separar el componente observacional de la teoría de sus “implicaciones ontológicas”. Así que, en su lugar, propone separar la información de la teoría entre lo que puede observarse y lo que no. Por supuesto, no da un criterio definitivo para realizar tal separación, y se limita a aceptarla, a fin de trabajar con ella, como hizo el positivismo lógico.

Eso sí, se supone, de nuevo, que la distinción se entiende de por sí, y que, además, es “empírica”. Van Fraassen dice que la “biología y la física últimas” nos proporcionan el criterio. Esto significaría que lo observable y lo inobservable serían conceptos relativos a las últimas investigaciones. Pero, ¿quién nos lo dice? ¿La Biología, la Psicología,

¹⁵⁰ Véanse estas dificultades, por ejemplo, en Carnap (1936, pp. 50 y ss.), Carnap (1966, pp. 225-226), o Hempel (1988, p. 182-183).

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

la Física, o la Ciencia en general? Porque lo que es observable e inobservable puede variar mucho según donde nos encontremos, si hacemos de alguna de estas ciencias el juez último sobre el que poder edificar la metodología, epistemología y filosofía científica. Lo grave no es que tuviéramos que estar al tanto de todo lo que se hace y se dice, sino que van Fraassen está apelando, ocultamente, a la *racionalidad instantánea*, tan denostada, entre otros, por Lakatos, y que puede conducir a errores muy graves a la hora de considerar como verdadero algo que posteriormente se va a demostrar que era falso (o que no era verdadero del todo). La Filosofía danzaría de un sitio para otro, sin saber muy bien dónde detenerse. Además, no tendríamos que mirar lo que dice la teoría en general, sino lo que dice sobre lo observable. Pero, ¿a cuál teoría, a qué escuela? Porque dentro de la Biología hay escuelas muy diferentes con opiniones encontradas acerca de lo que puede verse y de lo que no puede verse. Y no digamos en Psicología (conductistas, constructivistas...). ¿Y en Física? Aquí, como en todas las ciencias, hay muchas líneas de investigación, y muchas se contradicen entre sí: hay físicos que pueden considerar las supercuerdas como existentes y observables, mientras que otros las considerarían como puras ficciones. Dentro de la ciencia, hay muchas discrepancias acerca de lo observable y lo que no puede observarse. ¿Cuál es ese criterio, a la hora de buscar y escoger los textos científicos, que nos permitiera al final decir: “Esta es la ciencia “última” que estábamos buscando. Aquí está la distinción, el límite”?

Van Fraassen dice: “La ciencia misma designa como observable ciertas partes de esa imagen” ¿Dónde? ¿Cuándo lo dice? ¿Tal vez cuando se estudia la existencia de quarks? Pero entonces se supone que existen y que se pueden observar, si no a ellos, al menos los efectos que causarían sus propiedades. *Cuando se investiga la existencia de algo, primero se supone que existe, no que no existe.* Si luego resulta que las razones que explicaban la suposición de tal existencia pueden explicarse por otras causas fundamentadas (como ocurrió con el planeta Vulcano) entonces, sencillamente, no se dice que sean inobservables, sino que no existen y, por tanto, no aparecen en ningún sitio. Cuando se sospecha de la existencia de una partícula, se investiga su existencia. No se la supone inobservable; todo lo contrario, se actúa y se experimenta como si existiera y pudieran observarse sus efectos. *La ciencia no designa nada acerca de lo inobservable.* Este concepto, en su vocabulario, es inexistente. La teoría se ocupa de lo que puede observarse, y lo que no puede observarse no tiene cabida en ella. Todas las partes de la

VI. MODELOS SEMÁNTICOS

imagen científica se ocupan de lo observable. Lo que no puede observarse, para la ciencia, simplemente “no es”, y no se ocupa de ello¹⁵¹.

Porque lo que se observa no es lo que puede “verse”, sino lo que puede experimentarse. Una corriente eléctrica, un campo magnético, una masa, pueden experimentarse sin ser “vistas”. Su referencia no es “teórica”, o “inobservable”, sino puramente empírica, porque está ligada de modo completo y absoluto a la experiencia. Basta con experimentar los efectos de estos “inobservables” en la sensación, aunque no sea a través de los ojos. Es decir, *una medida puede experimentarse de muchas maneras, no sólo visualmente.* Un ciego puede hacerse una idea del mundo perfectamente sin tener que ver nada de lo que le rodea. A partir de las sensaciones que le llegan del tacto podría, por ejemplo, comparar pesos, corrientes eléctricas, temperaturas, etc. Y esa imagen podría hacerse muy precisa; podría elaborar instrumentos para precisar sus sensaciones, podría relacionar magnitudes en una ley, hacer fórmulas, establecer modelos, si no con toda la información que le pudiera proporcionar la vista, al menos de forma tan válida y útil como la nuestra, y con el mismo fundamento científico. La vista es un órgano *más*, y no debe constituirse en el tribunal de todas nuestras experiencias. Porque de lo que se trata, en definitiva, es de *medir* cantidades, y una medición puede efectuarse de muchas maneras, y no sólo “mirando”.

Otro supuesto criterio que habría de ayudarnos a distinguir entre lo observable y lo inobservable sería el antropocéntrico. Van Fraassen, a este respecto, señala como causas de la distinción nuestras “limitaciones *qua* seres humanos”, nuestros límites de percepción. La diferencia, ahora, radica en nuestro “organismo”. Dice van Fraassen:

Si tengo un mortero y una mano hechos de cobre y que pesan cerca de un kilo, ¿debería llamarlos rompibles porque un gigante podría romperlos?

Podríamos responder con otra pregunta: “¿Debería llamar “irrompible” a un objeto de cobre que pese no ya un kilo, sino una tonelada, cuando es algo que sucede normalmente en Resistencia de Materiales?” El mortero y la mano hechos de cobre pueden romperse, no porque lo haga un gigante, sino porque *lo hacemos nosotros*, que somos

¹⁵¹ Imaginemos la situación de un científico que, después de publicar una serie de ecuaciones sobre el sistema X, a los que ha llegado a partir de unos datos experimentales, pudiera decir: “Bien, y además de todo esto que he dicho del sistema X, tengo que añadir otra cosa: ‘es observable’”.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

los que diseñamos las máquinas que los rompen. Igualmente, el acero funde a 2000 °C, y no lo fundimos los hombres con nuestros cuerpos, sino en un alto horno, utilizando generadores de energía. En los dos casos, además, observamos que el primero se rompe y que el segundo se funde, aunque no podamos hacerlo sólo con nuestro “organismo”. Nuestras “limitaciones inherentes” son relativas, y no se miden por lo que puedan hacer por sí solas, sino por lo que hacen con ayuda de ciertos aparatos construidos por nosotros mismos. La observabilidad no depende de nuestro organismo, sino de la capacidad de nuestros sentidos de ir más allá y seguir observando fuera del “ámbito natural” de nuestra percepción.

No se puede aceptar una división observable-inobservable que se base en la diferencia entre ver un avión y ver una partícula subatómica. Si tanto el avión como la partícula dejan el rastro de la trayectoria que han seguido, es que están ahí, y es posible efectuar una medida de sus propiedades fundamentales. El avión tal vez pueda observarse directamente, pero tal vez no: los aviones supersónicos vuelan a alturas muy grandes para que el ojo humano, desde la Tierra, los advierta, y sin embargo concluimos su presencia. Si ahora alguien dice: “Esto es un caso distinto. Aunque no puedas ver al avión, lo verías si te acercaras hasta su altura.” Pero yo respondería: “Tú también puedes acercarte con el microscopio y ver la partícula.” Si a su vez se me responde: “Ni aun así veo la partícula; sólo veo su rastro”, entonces yo podría replicar: “Va demasiado rápido. Además, es un elemento muy inestable. Pero eso no es culpa suya. Al menos, deja huella.”

Que nosotros seamos limitados, no sólo en nuestra manera de ver, sino en otras facetas como las temporales o espaciales, eso no nos convierte en jueces sobre lo que podemos observar y lo que no. No podemos dividir el Universo en reinos ontológicos que hicieran referencia a nuestra manera limitada de sentir. Esto puede dar la falsa impresión de que una cosa es lo que la teoría diga en sus “especulaciones microscópicas” y otra es lo diga acerca de “nuestro mundo”, el del espectro visible. Cuando una teoría se pronuncia, lo hace acerca de toda la realidad, y no porque el científico quiera, sino porque las ecuaciones ligan dimensiones que se encuentran en todas partes, aquí y allá, en lo grande y en lo pequeño, y no existe ninguna división que en principio limite su alcance. Es decir, que los principios de la Relatividad o de la Mecánica Cuántica no son teorías que se ocupen más de lo inobservable que lo que pudiera hacer la Mecánica Clásica. Es más, ninguna se ocupa de lo inobservable, como ya he señalado antes.

VI. MODELOS SEMÁNTICOS

Suena un poco a broma pensar que la Teoría de la Relatividad, por ejemplo, es “buena” para las grandes velocidades y las distancias cósmicas, que la Teoría de Newton “funciona” para nuestro mundo porque incluso permite poner satélites en órbita, mientras que el reino de la Mecánica Cuántica está en las partículas microscópicas, sin que ninguna de ellas sea trasladable a otros dominios. Semejante visión *ingenua* de la ciencia no se ocupa del verdadero carácter que tienen leyes tan fundamentales, y de su pretensión de universalidad. Porque el principio de indeterminación de Heisenberg, aunque no lo “veamos”, rige, en principio, para nuestro mundo tanto como para el subatómico, y lo mismo ocurre con los principios de la Relatividad General, aunque a nosotros nos parezca que la luz de una linterna viaja en línea recta. Que no haya una teoría que sintetice ambas posiciones no significa que dejen de regir para lo que vemos. Lo que es ley para una cosa, lo es también para la otra.

La diferencia entre estos supuestos reinos es sólo de órdenes de magnitud, es decir, de medidas, algunas de las cuales podrían ser más fiables que otras, debido, efectivamente, a nuestras limitaciones. Pero es una cuestión de grado, no cualitativa. Porque una mesa, desde el punto de vista físico, tiene tanta realidad como un electrón, y es absurdo preguntarse sobre cuál es más real de los dos. Tanto la mesa como el electrón tienen sus propiedades perfectamente definidas, y no son más que sustratos lógicos a los que se les adscriben propiedades físicas concretas, es decir, medidas de su masa, de su carga, o de su temperatura¹⁵². Las dimensiones son las mismas en todas las regiones del Universo, y así lo considera la Física. Incluso si algún elemento de la realidad está siendo investigado, y todavía no se conocen sus propiedades, eso no lo hace “inobservable”, porque se lo estudia como si se analizara una mesa o un electrón¹⁵³. Todos los elementos de la realidad sistematizables para la Física tienen las mismas dimensiones fundamentales. No hay diferencia entre órdenes de magnitud, y no por ser una cosa más familiar que otra va a ser más real.

No hay entes descritos teóricamente y otros entes descritos observacionalmente. Incluso cuando se quiere confirmar la existencia de una entidad, se trata de la misma

¹⁵² Ya hemos visto cómo la “realidad” puede cambiar según cómo nos la representemos. Dos objetos “reales” pueden sustituirse por un objeto “matemático”, o “ficticio”. Pero “realidad” y “ficción” son predicados *metafísicos* que nos inventamos nosotros, y que no tienen cabida dentro del lenguaje de la Física.

¹⁵³ En todo caso, sería una entidad *dudosa*, pero nunca inobservable.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

manera que si se estudiara un nuevo motor de combustión: las reglas científicas son las mismas, y no hay ningún salto cualitativo entre mesas, alfombras, cristales y núcleos. *Todo se estudia de la misma manera*: todo se representa de la misma forma. Los modelos tienen reglas objetivas para su construcción: no se trabaja de forma distinta en Astronomía y en Física Nuclear: *hay un mismo método, aunque los modelos sean distintos*.

En conclusión,

1) Sigue sin darse un criterio básico para la distinción observable-inobservable¹⁵⁴.

2) La distinción no aparece en ningún texto científico.

3) *La teoría nunca se pronuncia sobre lo inobservable*. Esta “noción” no tiene ningún sentido para la ciencia. Que algo no se observe no quiere decir que sea “inobservable”, en el sentido de que “no pueda verse”, sino “no detectable”, lo cual es muy diferente.

4) Nuestros ojos no van a proporcionarnos un criterio infalible para discernir lo que es real de lo que no lo es; no más, al menos, que otros sentidos.

5) El universo, desde el punto de vista físico, no se divide en regiones según el orden de magnitud, tal que algunas fueran más familiares y verdaderas que otras, y donde valieran teorías diferentes.

6) Nuestra percepción no puede ser un límite a la observabilidad. La misma fiabilidad tiene un microscopio que una “visión directa”¹⁵⁵.

¹⁵⁴ No somos nosotros, los que creemos firmemente que no hay ninguna distinción, quienes tenemos que proporcionar este criterio. Sin este criterio, en realidad, no sabemos de qué estamos discutiendo.

¹⁵⁵ El instrumento de medida es un sistema de detección, un modelo que envuelve principios teóricos, de la misma forma que lo hace cualquier otro modelo teórico. Pero eso ni afecta a la objetividad de la información, ni hace que los aparatos resulten incomparables entre sí. Por ejemplo, ante la multitud de teorías (cf. Calvo, A., 1988) que se requieren para la construcción de un sonar (campos, ondas, circuitos, señales, hidroacústica, mecánica, resistencia de materiales, dipolos, termodinámica, semiconductores, transformadores, conmutadores, condensadores, transistores, tensiones, etc.), *¿a partir de qué nivel teórico se habría producido el salto cualitativo entre “observar directamente” y “observar indirectamente”?*

VI. MODELOS SEMÁNTICOS

7) Ninguna ciencia particular puede establecer los límites a la observabilidad, *fuera* de las propias leyes científicas. En particular, ni la Biología, ni la Psicología, le van a decir a un físico lo que es observable o lo que no lo es. Él trabaja, *directamente*, con lo observable.

Por todas estas razones, manifiesto que sigue siendo incomprendible, como ya ocurriera con Duhem, cuáles son las “implicaciones ontológicas” de las teorías (¿qué ontología, aparte de las variables y dimensiones que liga, puede tener una ecuación?), ni cuál es esa “estructura inobservable” más allá de los fenómenos. Reitero que esta distinción entre lo teórico y lo observable debe desaparecer del lenguaje de la Filosofía de la Ciencia y ser sustituida por un esfuerzo en comprender hasta qué punto todos los términos científicos se refieren a lo observable y resultan, por tanto, empíricos.

6.2.2. Crítica del isomorfismo (II)

El otro error básico del “empirismo constructivo” es, precisamente, su *realismo radical respecto de lo observable*. Basten las tres citas siguientes para ver hasta qué punto van Fraassen, cuando se trata de lo observable, defiende la *adaequatio rei et intellectus*, la conformidad de la estructura de lo real con la estructura del modelo.

Todas estas teorías se *complementan* y *superponen* entre sí, aportando una serie de ecuaciones con una información determinada que no tiene por qué resultar, en principio, incompatible con las demás. ¡Y todo ello, para medir la posición en función del tiempo, términos que se supone “observacionales”!

Cada vez que el sonar mida la distancia a la que se encuentra un objeto, podemos hablar de que esa medida está cargada teóricamente, si con ello queremos decir que esa observación ha sido posible gracias a las teorías utilizadas. Pero lo que no podemos afirmar es hay un cambio cualitativo entre observar “directamente” la posición de un objeto, y hacerlo “indirectamente” a través del sonar, simplemente porque hemos utilizado todas las teorías potencialmente relevantes para el funcionamiento del instrumento.

Una mejora tecnológica es un progreso teórico, porque teoría e investigación “empírica” no se diferencian entre sí, por mucho que nos empeñemos en separarlas. Los instrumentos resumen el estado técnico, tecnológico y teórico de una época; son, este sentido, *pura teoría*, porque se construyen con una tecnología cuyos principios se van precisando y adaptando a los progresos teóricos. La diferencia entre un ojo humano y un microscopio está en la cantidad de información que pueden discriminar, no en la calidad, no en la objetividad de la información. La observación no pierde fiabilidad; al contrario, la gana.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

In a very large class of models of the world as a whole, our solar system is a Newtonian mechanical system. In one such model, nothing except this solar system exists at all; in another the fixed stars also exist, and in a third, the solar system exists and dolphins are its only rational inhabitants. Now the world must be one way or another; so the theory is true if the real world itself is (or is isomorphic to) one of these models [...] The theory is true exactly if (a) one of the possible worlds allowed by the theory is the real world; or (b) all real things are the way the theory says they are¹⁵⁶.

La teoría es verdadera si alguno de sus modelos es “isomórfico” con el mundo real. Pero además,

Cuando la hipótesis es sólo acerca de lo que es observable, los dos procedimientos son equivalentes, pues en este caso la adecuación empírica coincide con la verdad¹⁵⁷.

Es decir, que cuando la teoría sólo se refiere a lo “observable” hace algo más que “salvar las apariencias”; en este caso, adecuación empírica y verdad coinciden. La teoría es empíricamente adecuada cuando la parte que se refiere a lo observable es isomórfica con el mundo, es verdadera. Como consecuencia,

Solamente las teorías exitosas sobreviven: aquellas que *de hecho* encajaron con regularidades reales en la naturaleza¹⁵⁸.

Después de todo, las teorías siguen “encajando” en la realidad. Exactamente igual que en el estructuralismo, exactamente igual que en los isomorfismos de Suppe; lo único que ahora no toda la teoría encaja, sólo la que se refiere a la parte observable del mundo, a las “subestructuras empíricas”. ¡Pero sigue habiendo isomorfismo! ¡La teoría sigue reflejando el orden de la naturaleza! ¡Los modelos son verdaderos porque lo que dicen acerca del mundo se cumple en la realidad: hay una *contrapartida* real para el modelo, en caso de que sea verdadero! ¡El componente realista del empirismo constructivo sigue siendo muy fuerte!

¹⁵⁶ Cf. van Fraassen, 1990, p. 226.

¹⁵⁷ Cf. van Fraassen, 1996, p. 97.

¹⁵⁸ Cf. van Fraassen, *op. cit.*, p. 61.

VI. MODELOS SEMÁNTICOS

Pero creo que a estas alturas ya he demostrado suficientemente hasta qué punto es ilógico hablar de “estructura del mundo”. Ya he mostrado cómo la realidad no tiene ninguna estructura única asociada a ella: los fenómenos de la naturaleza pueden ser representados de distintas maneras, mediante sistemas equivalentes, ninguno de los cuales es más verdadero que los demás, y ninguno de los cuales se acopla al mundo como si fuera una calcomanía o fotocopia. No creo que merezca la pena insistir más en ello: el isomorfismo sólo tiene sentido entre estructuras algebraicas perfectamente definidas; entre representaciones, no entre la representación y el mundo. ¡Somos nosotros quienes estructuramos las cosas en nuestra representación! ¡Nosotros decidimos sobre lo real, y lo sistematizamos en un modelo! ¡El modelo es una *síntesis* sobre lo que conocemos (hipotéticamente) de un fenómeno: no es una copia!¹⁵⁹

Sin embargo, para que quede claro definitivamente qué entiendo por una síntesis, y para comprender que nunca es posible *ningún* isomorfismo entre la representación y la realidad, consideraré un modelo sencillo de Mecánica Clásica, donde los únicos términos que intervienen son la posición y el tiempo, que según van Fraassen (1996, p. 68) se refieren a cosas observables dentro de la teoría, por contraposición a la masa, por ejemplo, que supuestamente se refiere a cosas inobservables¹⁶⁰.

Supongamos que quiero representar el movimiento de un objeto lanzado desde una altura de quinientos metros con una velocidad inicial igual a cero. Las ecuaciones cinemáticas de Galileo son:

$$\begin{cases} v = gt \\ L = L_0 - \frac{1}{2}gt^2 \end{cases}$$

¹⁵⁹ Este fue el gran logro del idealismo alemán, desde Kant a Hegel. Nosotros no “ponemos” la realidad, no nos la inventamos; pero tampoco la copiamos: la reconstruimos en la representación.

¹⁶⁰ Cf. van Fraassen (1996, p. 31): “Un cálculo de la masa de una partícula a partir de la desviación de su trayectoria en un campo de fuerza conocido, no es una observación de esa masa”. Pero tan experimentable es una masa como el tiempo o el espacio. Ya puestos, ¿por qué no hacemos del tiempo un “inobservable”? Porque del tiempo sólo se conocen sus efectos, por ejemplo, a través de un reloj, igual que una masa se conoce a través de una báscula, o a través de la desviación de su trayectoria en un campo de fuerza.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

L es la altura a la que se encuentra el objeto, y que en nuestro caso puede valer desde 500 metros hasta 0 metros; L_0 es la altura inicial, 500 m; v es la velocidad del objeto, que medimos en m/s; g es la aceleración que sufre el cuerpo desde que comienza el movimiento hasta que termina, y cuyo valor suponemos constante e igual a $9,8 \text{ m/s}^2$; t es el tiempo que tarda el cuerpo en recorrer cierto segmento de longitud y se mide en segundos.

Hemos caracterizado un fenómeno particular con ciertas propiedades que constituyen su esencia física. De acuerdo con el análisis dimensional, estas propiedades son dimensiones físicas, tal que la *longitud* es una dimensión simbolizada por [L], el *tiempo* es otra dimensión, [T]; la *velocidad* es otra dimensión, que resulta una combinación de las anteriores: $[L][T]^{-1}$; e igualmente g tiene otra dimensión, que corresponde a la *aceleración*, cuyas dimensiones básicas, en función del espacio y del tiempo son $[L][T]^{-2}$.

A pesar de que escribimos la velocidad y la aceleración en términos de la longitud y del tiempo, no por ello debemos pensar que estas propiedades sean “derivadas” de las anteriores o menos fundamentales. La Física puede considerar que todas las dimensiones físicas pueden expresarse como una combinación del espacio, [L], del tiempo, [T], de la carga, [Q], o de la masa, [M]. Pero una combinación de estas dimensiones se da en cantidades físicas tan importantes como la energía, de dimensiones $[M][L]^2[T]^{-2}$, que en ningún caso resulta menos importante que las anteriores. No hay propiedades o dimensiones que prevalezcan sobre otras: todos los términos se refieren a la experiencia y a una medida de la sensación. Son todas igual de importantes y, por supuesto, ninguna es más abstracta o empírica que las demás¹⁶¹.

La única división que efectuamos es entre términos primitivos, aquellos que son datos del problema, y que ya se conocen, y términos derivados, aquellos que se trata de calcular en función de los primeros. En nuestro caso, queremos conocer la longitud que recorre el cuerpo en función del tiempo que transcurre. Para ello fijamos nuestra atención en la segunda ecuación del sistema de ecuaciones anteriormente descrito, donde sustituimos el valor de la altura inicial:

$$L = 500 - \frac{1}{2}gt^2$$

¹⁶¹ Sobre esto, me remito al Cap. VII, a la hora de hablar de la Filosofía de la Ciencia de Cartwright.

VI. MODELOS SEMÁNTICOS

Se supone que esta ecuación es una “subestructura empírica” que hemos obtenido a partir de simplificaciones y suposiciones desde las leyes fundamentales de Newton. Vamos a comprobar que el modelo es “adecuado empíricamente”. Si lo es, y dado que se trata de términos observables, podemos decir que el modelo es verdadero y que “encaja” con la estructura del fenómeno en la naturaleza. Para ello, y con ayuda del programa EXCEL, vamos a obtener una serie de valores para la longitud L (variable dependiente) en función del tiempo t (variable independiente).

Como siempre, partimos de una serie de medidas consideradas fiables y verdaderas, la “tabla empírica” de datos. Consideraré una serie de datos imaginarios, que pretenden dar una idea de lo que ocurriría de efectuarse realmente estas medidas. La tercera columna de la *Tabla 6.1* indica estas medidas, con un solo decimal, para simplificar. Para $t = 0$ el cuerpo está arriba del todo, en una altura igual a 500 metros. La primera columna es la serie de valores de tiempos, que es la variable que marca las medidas; en este caso, cada segundo. La segunda columna son los valores de la altura predichos por el modelo a partir de la ecuación de Galileo.

Tiempo	Espacio (Predicción)	Medidas (Datos)	Error	Porcentaje
0	500	500	0	0
1	495,1	494,3	0,8	0,16158352
2	480,4	481,1	0,7	0,14571191
3	455,9	454,9	1	0,21934635
4	421,6	420,5	1,1	0,26091082
5	377,5	376,6	0,9	0,2384106
6	323,6	324,1	0,5	0,15451174
7	259,9	260,2	0,3	0,11542901
8	186,4	186,1	0,3	0,16094421
9	103,1	103,9	0,8	0,77594568
10	10	9,9	0,1	1

Tabla 6.1

Procedamos a la comparación. Un primer cotejo nos muestra que nuestro modelo se adapta bastante bien, pero que *no llega a la exactitud*. El error entre los datos arrojados por el modelo y los datos empíricos puede calcularse restando, en valores absolutos, nuestra predicción teórica, la que llega del modelo, con el resultado real, escrito en la

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

tabla empírica. El error puede deberse, bien a la incertidumbre de las medidas, bien a la inexactitud del modelo. Pero dentro de cierta tolerancia, dentro de cierta magnitud del error, podemos considerar los resultados como satisfactorios.

El modelo, desde luego, nunca se ajusta perfectamente, lo cual bastaría para rechazar el isomorfismo entre los datos de observación y los datos del modelo. Pero supongamos que así fuera, y que pudiéramos acercarnos tanto como quisiéramos a la exactitud de los datos reales. Podríamos tener en cuenta la resistencia del aire, que g no es una constante, y que varía según la longitud y la latitud (como hemos calculado en el Cap. III). El modelo todavía no sería isomórfico. Pero vamos más allá, e introducimos correcciones relativistas y cuánticas, y utilizamos los instrumentos más precisos de medición. Vamos a suponer incluso que existe un *Super-Modelo* que tiene en cuenta absolutamente todo acerca de lo que conocemos sobre la caída libre de un cuerpo. ¿Cómo comprobaríamos su “isomorfismo”?

Tendríamos que proponer otra serie de medidas mucho más sofisticadas y precisas que aquellas de las que partíamos. Estas medidas, supongamos, no miden la posición del cuerpo cada segundo, ni cada medio segundo, ni cada cuarto de segundo, sino que se establecen para cada 0,0000000001 segundos. Incluso supongamos que podemos ir más allá y que una comunidad de super-científicos pudiera escoger arbitrariamente la escala de tiempo a partir de la cual podrían medir las posiciones sin ningún límite técnico. Es decir, que cada 10^{-x} segundos, donde x es un número tan grande como se quiera, estuviera disponible la posición del cuerpo de acuerdo con una medida.

Pues bien, ni aun así podría comprobarse el isomorfismo del modelo con la realidad, puesto que habría *infinitos tiempos* donde no se podría establecer ninguna serie de medidas. *Cualquiera que sea el intervalo escogido de tiempo para efectuar dos mediciones, habría infinitos tiempos, dentro de ese intervalo, por mínimo que fuera, donde sería imposible entrar en la naturaleza para medirla*¹⁶².

Nuestras medidas operan *discretamente* sobre la realidad: sólo nos dan puntos. La realidad nunca muestra su estructura total, sólo lo hace discretamente. Tenemos que suponer que allí donde no alcanzamos a medir existe un continuo que va a seguir obe-

¹⁶² Me refiero, desde luego, a la *hipótesis del continuo* de Cantor, y al hecho de que entre dos números reales hay siempre un infinito de números que no podemos contar. Esto se traduce, para los fundamentos de una Teoría de la Medida, en que *hay infinitos puntos de la Naturaleza a los que resulta imposible acceder*.

VI. MODELOS SEMÁNTICOS

deciendo a nuestro modelo. *Pero eso es una suposición, que lo único que hace es transformar una serie de medidas discretas en un modelo de datos, en una función continua y diferenciable que nosotros suponemos que existe en la realidad para poder representarla*¹⁶³. Pero con ello el mundo ha adquirido una estructura que de por sí *no* tenía. El isomorfismo se daría, en todo caso, entre estos modelos de datos y los modelos que una teoría puede proporcionar, después de ciertas simplificaciones y suposiciones. El isomorfismo, insisto, es entre estructuras, no entre una representación y el mundo. El mundo no se muestra directamente, sino sólo a través de una serie de medidas.

Por eso es tan importante la distinción que he realizado entre el modelo como síntesis y el modelo como resumen. *Una síntesis no es nunca un resumen*, puesto que va mucho más allá de una serie de datos iniciales. El modelo no se limita simplemente a recogerlos; no se limita a devolver esta serie de medidas, más o menos aproximadas; un modelo que sólo arrojará valores para una serie de medidas conocidas sería perfectamente inútil; no serviría para avanzar. *Porque el modelo también se pronuncia sobre una infinidad de posiciones que ninguna máquina de medición podría recoger*. El modelo establece un continuo entre todos los puntos y completa lo que no podría ser dicho mediante una serie de medidas, por muy precisas que fueran. El modelo hace más que resumir: rellena el hueco existente entre una serie de medidas y representa un fenómeno como continuo. ¡Esto es lo que realmente hace un modelo, ésta es su característica básica!

Por eso la relación de isomorfismo sólo podría darse entre representaciones, nunca entre el modelo y la realidad. Porque nosotros estructuramos las medidas efectuadas en la naturaleza y vamos más allá, sin conformarnos con una simple “tabla empírica”. Nuestros modelos científicos apuestan por dar una continuidad a todos estos datos y considerarlos como parte de un único fenómeno, como parte de un único mecanismo. ¡Así devolvemos las apariencias, las medidas, al control del Logos, como quería Platón! ¡Ahora podemos computar nuevas posiciones, comprobar las predicciones, observar hasta qué punto las medidas se desvían de nuestro modelo previo, mejorar las teorías! ¡Y todo ello gracias a que la representación *sintetiza* la información, no la resume, ni hace fotocopias!

¹⁶³ Cf. Cap. II, de cómo los astrónomos de la Antigüedad sabían lo que estaban haciendo al usar la Geometría.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Retrocedamos unos siglos atrás y supongamos que Galileo tiene una serie de medidas m_1, m_2, \dots, m_n , de la altura de un objeto que cae desde una torre de 20 metros en función del tiempo. Ahora imaginemos el momento en el que descubre que la longitud es función del cuadrado del tiempo. Una persona entra en el cuarto y le dice: “¡Lo único que has hecho es resumir la información que ya tenías!”. Entonces Galileo le muestra la siguiente hoja, que nosotros hemos hecho en EXCEL, pero que él habría podido calcular perfectamente por otros medios, incluso a mano. Suponiendo que en la *Tabla 6.2* las celdas sombreadas correspondieran a las medidas que Galileo tenía, ¡cuánto más no hacía el modelo además de predecir! ¡Infinitas predicciones, para infinitos tiempos! En la *Tabla 6.2* sólo están escritas las predicciones para 190 tiempos diferentes, que corresponden a una serie de $t_n = t_{n-1} + 0,01$. ¡Pero podríamos haber escogido otras series mucho más pequeñas! *¡El modelo, una vez que encuentra la ecuación, no deja nunca de predecir!* ¡No se detiene! ¡Para eso ha sido construido!

VI. MODELOS SEMÁNTICOS

Tiempo	Espacio (Predicción)	Tiempo	Espacio (Predicción)	Tiempo	Espacio (Predicción)	Tiempo	Espacio (Predicción)	Tiempo	Espacio (Predicción)
0	20	0,38	19,29244	0,76	17,16976	1,14	13,63196	1,52	8,67904
0,01	19,99951	0,39	19,25471	0,77	17,09479	1,15	13,51975	1,53	8,52959
0,02	19,99804	0,4	19,216	0,78	17,01884	1,16	13,40656	1,54	8,37916
0,03	19,99559	0,41	19,17631	0,79	16,94191	1,17	13,29239	1,55	8,22775
0,04	19,99216	0,42	19,13564	0,8	16,864	1,18	13,17724	1,56	8,07536
0,05	19,98775	0,43	19,09399	0,81	16,78511	1,19	13,06111	1,57	7,92199
0,06	19,98236	0,44	19,05136	0,82	16,70524	1,2	12,944	1,58	7,76764
0,07	19,97599	0,45	19,00775	0,83	16,62439	1,21	12,82591	1,59	7,61231
0,08	19,96864	0,46	18,96316	0,84	16,54256	1,22	12,70684	1,6	7,456
0,09	19,96031	0,47	18,91759	0,85	16,45975	1,23	12,58679	1,61	7,29871
0,1	19,951	0,48	18,87104	0,86	16,37596	1,24	12,46576	1,62	7,14044
0,11	19,94071	0,49	18,82351	0,87	16,29119	1,25	12,34375	1,63	6,98119
0,12	19,92944	0,5	18,775	0,88	16,20544	1,26	12,22076	1,64	6,82096
0,13	19,91719	0,51	18,72551	0,89	16,11871	1,27	12,09679	1,65	6,65975
0,14	19,90396	0,52	18,67504	0,9	16,031	1,28	11,97184	1,66	6,49756
0,15	19,88975	0,53	18,62359	0,91	15,94231	1,29	11,84591	1,67	6,33439
0,16	19,87456	0,54	18,57116	0,92	15,85264	1,3	11,719	1,68	6,17024
0,17	19,85839	0,55	18,51775	0,93	15,76199	1,31	11,59111	1,69	6,00511
0,18	19,84124	0,56	18,46336	0,94	15,67036	1,32	11,46224	1,7	5,839
0,19	19,82311	0,57	18,40799	0,95	15,57775	1,33	11,33239	1,71	5,67191
0,2	19,804	0,58	18,35164	0,96	15,48416	1,34	11,20156	1,72	5,50384
0,21	19,78391	0,59	18,29431	0,97	15,38959	1,35	11,06975	1,73	5,33479
0,22	19,76284	0,6	18,236	0,98	15,29404	1,36	10,93696	1,74	5,16476
0,23	19,74079	0,61	18,17671	0,99	15,19751	1,37	10,80319	1,75	4,99375
0,24	19,71776	0,62	18,11644	1	15,1	1,38	10,66844	1,76	4,82176
0,25	19,69375	0,63	18,05519	1,01	15,00151	1,39	10,53271	1,77	4,64879
0,26	19,66876	0,64	17,99296	1,02	14,90204	1,4	10,396	1,78	4,47484
0,27	19,64279	0,65	17,92975	1,03	14,80159	1,41	10,25831	1,79	4,29991
0,28	19,61584	0,66	17,86556	1,04	14,70016	1,42	10,11964	1,8	4,124
0,29	19,58791	0,67	17,80039	1,05	14,59775	1,43	9,97999	1,81	3,94711
0,3	19,559	0,68	17,73424	1,06	14,49436	1,44	9,83936	1,82	3,76924
0,31	19,52911	0,69	17,66711	1,07	14,38999	1,45	9,69775	1,83	3,59039
0,32	19,49824	0,7	17,599	1,08	14,28464	1,46	9,55516	1,84	3,41056
0,33	19,46639	0,71	17,52991	1,09	14,17831	1,47	9,41159	1,85	3,22975
0,34	19,43356	0,72	17,45984	1,1	14,071	1,48	9,26704	1,86	3,04796
0,35	19,39975	0,73	17,38879	1,11	13,96271	1,49	9,12151	1,87	2,86519
0,36	19,36496	0,74	17,31676	1,12	13,85344	1,5	8,975	1,88	2,68144
0,37	19,32919	0,75	17,24375	1,13	13,74319	1,51	8,82751	1,89	2,49671

Tabla 6.2

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

¿Está aquí “resumida” la información? Porque las medidas originales son solamente 19 de las 190 predicciones que se ofrecen en la Tabla. Pero podrían haber sido muchísimas más, porque el modelo arroja un número para todo número real. Es decir, que se trata de una función $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ que arroja un valor de la variable dependiente (la longitud) para cada valor de la variable independiente (el tiempo). ¿Está aquí resumida o “comprimida” la información? ¿O más bien está *sintetizada*?

Ya vemos lo que es capaz de hacer el modelo. Lo mismo ocurría en Astronomía Antigua: la Física no ha cambiado, su método es esencialmente el mismo. Una ecuación describe el comportamiento de un fenómeno. Pero “describir” no es “copiar”, ni “resumir”, sino *sintetizar*. Por eso luego puede predecir, y por eso luego puede explicar: porque es lo mismo, sólo que al revés¹⁶⁴.

No obstante, Galileo creía que g era una constante. Newton precisó cómo variaba esta constante. El isomorfismo entre estructuras es un ideal científico. La realidad nunca coincide con nuestros modelos. Incluso si existiera la Super-Teoría-del-Todo, nunca podríamos estar seguros de que existe semejante isomorfismo, pues el modelo de datos puede cambiar, hacerse más preciso, a partir de un cambio en los enunciados de observación aceptados, como ocurriera con las Tablas Astronómicas del Cap. II. Y lo que es más grave: puede existir otra función que modele mucho mejor el conjunto de datos discretos que se obtiene a partir de las medidas. Lo que antes se consideraba isomórfico, ahora no sería más que una aproximación “útil”. *El isomorfismo entre un modelo teórico de datos y la realidad nunca es exacto, y nunca podrá serlo. Aunque el objetivo de la ciencia sea lograr semejante isomorfismo, es una tarea imposible de realizar, por mucha mejora que se dé en los instrumentos de observación y en los modelos: siempre habrá un modelo más preciso que se adapte mejor a los datos experimentales.*

El modelo es una síntesis de las medidas que la ciencia dispone en un determinado momento. Cuando las medidas se hacen más precisas, gracias, en parte, a la ayuda de las nuevas teorías, los modelos van cambiando, porque se descubren matices que antes no se conocían. El *aumento del detalle* trae consigo una mejora de las teorías, y, en su caso, una reinterpretación de todo lo que anteriormente se conocía bajo unos nuevos

¹⁶⁴ Aquí nunca se equivocó el positivismo lógico.

VI. MODELOS SEMÁNTICOS

pilares¹⁶⁵. La verdad, concluyo, es una cuestión de *precisión*, y es un objetivo totalmente *inalcanzable*.

6.3. Modelos cognitivos de Giere

En los dos apartados que restan para terminar este capítulo, y una vez que creo haber establecido una crítica definitiva para el isomorfismo y, en general, para las pretensiones realistas, abordaré mi segunda crítica a la similaridad, que también espero que sea definitiva. Si en la primera crítica me esforzaba por mostrar cómo no hay ninguna similitud entre la representación y el mundo, ahora me detendré en el parecido que pueden mostrar un modelo de datos, la naturaleza, y un modelo justificado teóricamente. Con este fin, realizo una crítica de los puntos fundamentales de la filosofía de Giere (1988), y sobre las pretensiones de la “similaridad”, que en ningún caso rebaja la carga ontológica y metafísica del isomorfismo.

Para Ronald Giere (1988, p. 1) la ciencia es una actividad cognitiva, lo que significa que atiende a la generación del conocimiento. Las teorías científicas deberían ser tratadas de modo similar a cómo se estudian las ciencias cognitivas, es decir, sobre la base de ciertas representaciones, “*schemata*”, las cuales no tienen por qué ser necesariamente verdaderas o falsas, sino más o menos apropiadas, según el fin para el que han sido construidas, y cuyos límites de aplicación se expresan mediante grados de similaridad. La mente no es un espejo de la naturaleza¹⁶⁶; tampoco la ciencia.

Mientras que para el realismo científico aceptar una teoría significa creer que la mayoría de los elementos de la teoría representa más o menos, en algunos aspectos, el mundo, para el antirrealismo las teorías aceptadas serían instrumentos más o menos aceptables para solucionar problemas. La posición de Giere es la de un “realista constructivo”, por oposición tanto al empirismo constructivo de van Fraassen como al realismo metafísico (que busca la unidad en un modelo sin restricciones, perfecto, único y completo) o al realismo convergente (que afirma que la ciencia avanza hacia la verdad absoluta).

¹⁶⁵ Ésta es la esencia de las “revoluciones científicas” de Kuhn (1975).

¹⁶⁶ *Ibid.* p. 6.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

The view I call constructive realism, then, is intended to be a restricted form of realism in the sense that theoretical hypotheses are interpreted as asserting a similarity between a real system and some, but not necessarily all, aspects of a model. The question of which aspects, and why not others, is left to be resolved on a case-by-case basis by scientists themselves¹⁶⁷.

Giere piensa que las leyes son verdaderas sólo para el modelo, y que los sistemas reales no satisfacen las ecuaciones. Más concretamente (cf. *op. cit.* p. 79):

The interpreted equations are true of the corresponding model. But truth here has no epistemological significance. The equations truly describe the model because the model is defined as something that exactly satisfies the equations.

Consecuencia de ello es que las leyes del movimiento no son generalizaciones empíricas; e incluso si así fueran, serían tomadas como falsas o al menos como irrelevantes. Para el modo como trabajan los científicos, la verdad es algo irrelevante, aunque lógicamente pudieran encontrarse ecuaciones verdaderas. La verdad literal, exacta, de las leyes científicas, es algo muy difícil de conseguir, incluso para un sistema tan sencillo como un péndulo, donde se trabaja con aproximaciones¹⁶⁸.

Las leyes fundamentales, por sí solas, no tienen ningún contenido empírico. Ni siquiera pueden ser verdaderas o falsas, si las comparamos con el mundo real. La Física contemporánea no trabaja con generalizaciones universales, sino con modelos teóricos, donde se introducen las leyes. En un modelo gravitatorio de Newton la justificación se obtiene a partir de los datos experimentales, del acuerdo con la observación, y no por utilizar la ley de gravitación universal. Giere cree que la importancia de la Mecánica no disminuye si eliminamos las generalizaciones, que pudieron ser importantes en los siglos pasados, pero que hoy en día no se utilizan en ciencia¹⁶⁹.

En lugar de las leyes, el peso del método científico recae en los modelos, que Giere llama “modelos teóricos” para diferenciarlos de los modelos lógicos de las ciencias formales. Por modelos teóricos entiende un oscilador lineal, la noción de fuerza central,

¹⁶⁷ *Op. cit.*, p. 97.

¹⁶⁸ *Ibid.*, p. 77.

¹⁶⁹ *Ibid.*, pp. 102-103.

VI. MODELOS SEMÁNTICOS

un péndulo sin fricción... Estas son entidades construidas, abstractas, útiles para los científicos; en todo caso, constituyen entidades no lingüísticas.

Los modelos tienen diferentes *grados de abstracción*.¹⁷⁰ Un oscilador simple comienza siendo un sistema con una fuerza recuperadora lineal, más otras fuerzas secundarias. Después, un oscilador armónico es un oscilador lineal solamente con la fuerza restauradora. Para un oscilador amortiguado se tiene en cuenta la fuerza anterior más otra que lo amortigua. Y lo mismo sucede con el péndulo: pasamos de un modelo de oscilador caracterizado por una fuerza recuperadora y la tensión de una cuerda idealizada, a un modelo de péndulo cuya fuerza es función de la gravedad y de la longitud de la cuerda. Un oscilador lineal puede ser considerado entonces como una *familia de modelos* que varía en grados de abstracción.

Los modelos funcionan como representaciones, y tratan de ser modelos *de algo*, y no solamente ejemplares para construir otros modelos teóricos. Los científicos representan el mundo a partir de estos modelos, utilizando lo que Giere (*ibíd.*, p. 80) llama *hipótesis teóricas*.

Una hipótesis teórica es, a diferencia de un modelo, una entidad lingüística, un enunciado que afirma una relación entre el modelo y el sistema real que representa. Como enunciado, puede ser verdadero o falso, dependiendo de que esa relación se mantenga o no. Sin embargo, para la relación entre el modelo y la realidad no puede darse verdad o falsedad, ya que los modelos no son entidades lingüísticas. No hay ningún impedimento lógico, para Giere, de que esta relación sea de isomorfismo, como sugiere van Fraassen, pero le parece mucho más adecuado hablar de *similaridad*, ya que es una noción más débil que se encuentra frecuentemente en los textos científicos, donde incluso se rechaza el isomorfismo.

La similaridad no es un concepto absoluto, sino que se refiere a distintos aspectos y grados de la realidad. La hipótesis teórica identifica un sistema real y lo hace similar a un modelo en determinados aspectos y niveles. En el ejemplo de Giere (cf. *ibíd.*, p. 81):

The positions and velocities of the earth and moon in the earth-moon system are very close to those of a two-particle Newtonian model with an inverse square central force.

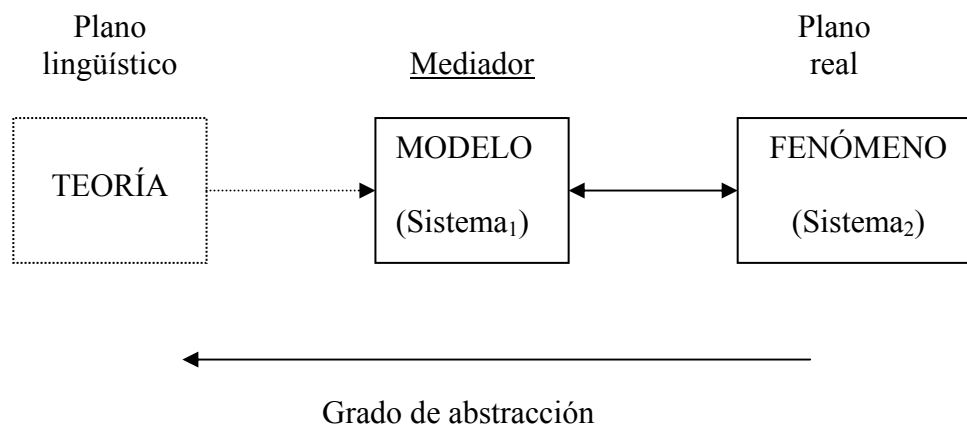
¹⁷⁰ *Ibid.*, pp. 79-80.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Los aspectos que se comparan en este caso son las posiciones y las velocidades, y el grado de similaridad se indica por la expresión “muy alto”. La verdad de las hipótesis no tiene tanta importancia como el hecho de que a través de esa verdad se asegure una comparación entre sistemas y se afirme cierto grado de similaridad entre la realidad y el modelo. Parece incluso que la verdad es una excusa, un simple medio para formar modelos (*ibíd.*):

A “theory of truth” is not a prerequisite for an adequate theory of science.

La razón es que Giere niega la relación directa de correspondencia entre los enunciados y la realidad. Lo que en cualquier caso resulta más o menos similares es la representación y la realidad, por lo que el modelo actúa como un intermediario entre las hipótesis teóricas científicas y el mundo real, como se aprecia en la siguiente figura:



Las teorías, para Giere (*ibíd.*, p. 85) contienen los siguientes elementos: a) un número importante de modelos; b) una serie de hipótesis teóricas que los ligan a la realidad. Los modelos, entonces, son parte de la teoría, lo mismo que ciertas hipótesis. ¿Pero, cuáles, y hasta dónde? Giere admite que las teorías son entidades que no se pueden definir mediante condiciones necesarias y suficientes, y cree que la cuestión no tiene mucha importancia: mientras que la mayoría de los científicos admitirían que una hipótesis teórica como “hay cierta similaridad entre el sistema solar y los modelos de Newton” es parte de la teoría, otras como “hay cierta similaridad entre mi reloj y un oscilador armónico” serían más discutibles. Lo importante es que un sistema real es *identifi-*

VI. MODELOS SEMÁNTICOS

cado como similar a un modelo, y esta identificación se realiza a partir de una comunidad de científicos que deciden hasta qué punto la similaridad es suficiente (*ibid.*, p. 86).

Para que las hipótesis teóricas no sean vacías, se necesita especificar los aspectos y los grados de la similaridad. “An agreement on its truth or falsity depends on a prior agreement regarding specifications of respects and degrees.”¹⁷¹ Pero este acuerdo es social, independiente de los modelos y de la realidad del mundo. Estas especificaciones no necesitan ser hechas de modo explícito, y la ciencia no suele hacerlo.

Por otra parte, y frente a la posición de Cartwright (1991) de que las leyes generales de la Física mienten, para Giere (cf. *ibid.*, p. 90) las leyes de Newton y la ecuación de Schrödinger no pueden mentir porque no dicen nada acerca del mundo; son parte de la caracterización de los modelos teóricos, y no son modelos por sí solos, ya que no hay ningún sistema real que sea definido por ellos.

Los modelos teóricos son representaciones parciales de los sistemas del mundo real, por lo que no hay una unificación formal de las teorías de la Física, sino una “familia de familias de modelos”. Para ser una teoría científica (*ibid.*, p. 91), no es necesario que su familia de modelos se genere a partir de axiomas generales, ni que expliquen los hechos de forma nomológica-deductiva; basta que desarrollen una familia de modelos con aplicaciones al comportamiento de distintas clases de sistemas.

Hasta aquí, parece que las diferencias entre van Fraassen y Giere, dentro de una visión semántica de las teorías, no van más allá del cambio de la relación de isomorfismo por la de similaridad. Pero Giere (*ibid.*, p. 75) duda de la distinción entre observable e inobservable:

One does, however, find informal references to the determination of mass, force, position, and momentum. These references might be interpreted as implicit invocations of correspondence rules except for the fact the authors make no distinction between what is “observable” and what is not. The informal references to measuring forces, which philosophers generally regard as “theoretical”, are no different in character from those referring to positions, which are supposed to be “observable”.

Además, en su experiencia con los físicos nucleares de The Indiana University Cyclotron Facility (IUCF), Giere (*ibid.*, p. 124) señala que los científicos creen en la existencia de protones y neutrones, así como en sus propiedades: masa, carga, momen-

¹⁷¹ Cf. *ibid.*, p. 108.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

to. Su realismo constructivo considera necesario también creer en la existencia de estas supuestas entidades teóricas, si lo que queremos, como intérpretes de la ciencia, es tener una visión adecuada del trabajo diario de los científicos. Cuando se producen protones a partir de la energía, o cuando se utilizan para investigar las propiedades de distintos núcleos, es difícil dudar que tales entidades no existan (*ibid.*, p. 125).

La actitud de los físicos a la hora de manipular y controlar estas partículas muestra la confianza que tienen en su existencia. En este sentido, podría considerarse que la manipulación es una guía eficaz para inferir la realidad de las entidades puestas en duda, pero Giere (*ibid.*, p. 126) afirma que sería difícil especificar en términos generales de qué tipo y cuánta cantidad de manipulación sería necesaria. Tendría que decidirse caso por caso.

Lo que está claro es que los protones se utilizan como instrumentos de búsqueda, y los científicos no dudan de su existencia, aunque, por otra parte, muestren sus reservas respecto a los modelos nucleares. Aunque a principios del siglo XX el protón fuera una entidad teórica, cuando Rutherford comenzó sus experimentos con partículas alfa, hoy en día se utiliza como una herramienta de investigación, como tecnología, para descubrir propiedades de la estructura del núcleo. La construcción del ciclotrón, por ejemplo, pone de manifiesto que el protón es utilizado para realizar innovaciones tecnológicas. Giere concluye (*ibid.*, p. 127):

Focusing on contemporary research tools that were once theoretical entities exposes this empirical failing of both empiricism and constructivism.

Además (*ibid.*, p. 96), no hay nada en la estructura matemática de los modelos que distingan entre partes reales y partes que no lo sean. Sin embargo, postular que el modelo tiene una contrapartida real puede llevar a descubrimientos importantes, como el positrón de Dirac.

El empirismo constructivo de van Fraassen, entonces, es empíricamente inadecuado. La distinción entre teoría y observación no puede trazarse sino de un modo arbitrario. Pero lo más importante, no consigue que comprendamos nada acerca de la ciencia real. En el laboratorio, la única distinción parecida es entre los datos experimentales y el modelo. Por ejemplo, los datos pueden ser la energía de los protones antes del impacto y el ángulo con el que salen despedidos los neutrones. A partir de estos datos, los científ-

VI. MODELOS SEMÁNTICOS

cos elaboran modelos que se centran en los detalles del núcleo. Los datos pueden ser una lista de números o una serie de gráficos producidos en el ordenador. Las señales van directamente desde los sensores hasta el ordenador. No existe una observabilidad directa.

De todas formas, Giere (*ibid.*, p. 129) habla de protones y de otras entidades de las que la ciencia ha dado garantía suficiente para su existencia; otra cosa es la estructura del núcleo, tal como es descrita en la actualidad por los modelos teóricos. Para adoptar una posición realista en estos campos relativamente novedosos, se necesita información adicional.

Baste lo dicho sobre la crítica de Giere a van Fraassen y sobre las razones para apoyar el realismo constructivo. Respecto de la variedad de modelos en Física Nuclear, Giere cree observar que los físicos nucleares utilizan modelos visualizables, la mayoría de los cuales pueden ser dibujados en un papel. Los científicos operan con familias de modelos, más que con sistemas formales de axiomas, y no todos son compatibles. Algunos modelos utilizan la ecuación de la Mecánica Cuántica, mientras que otros acuden a la Mecánica Clásica, e imaginan las reacciones nucleares como un choque inelástico entre bolas de billar; hay modelos que mezclan las dos imágenes, y modelizan los protones como esferas sólidas con momento angular cuántico. Los físicos mismos reconocen las limitaciones de sus modelos. Giere (*ibid.*, p. 137) constata que los físicos prefieren trabajar con modelos clásicos o semiclásicos antes que con los complejos sistemas cuánticos.

Ya que no es posible determinar el potencial de un núcleo debido al problema de los n cuerpos; entonces se procede por aproximaciones, sin que haya un modelo completamente satisfactorio. La mejor manera para ello es ignorar algunas interacciones. Otros métodos se basan en las ecuaciones de Schrödinger sin incluir efectos relativistas, aunque se emplea la cinemática relativista, por ejemplo, en la ecuación de Dirac. No hay algo así como un modelo de Schrödinger, sino una familia de modelos. Distintas maneras de aproximarse conllevan diferentes potenciales, muchos de los cuales son indistinguibles experimentalmente. En todo caso, la unidad de estos modelos sería más bien orgánica que deductiva¹⁷².

¹⁷² Cf. *ibid.*, p. 184.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Los valores teóricos de la polarización o del espín debido a la rotación, se calculan a partir de una serie de modelos básicos. Estos “data points” son representados con barras que muestran el error estadístico. Después se comparan las curvas teóricas y se juzga hasta qué punto es adecuado el modelo: bueno, razonablemente bueno, extraordinariamente bueno, malo, regular, etc. Los buenos experimentos tendrían un margen del 2 por ciento, pero los modelos nucleares están dentro de un 20 por ciento de error.

Giere destaca (*ibíd.*, pp. 221, 226-226) que los datos, por sí solos, en ocasiones no son capaces de discernir entre modelos. En estos casos, no hay un consenso general, ni una única decisión racional. Aunque, por ejemplo, el enfoque de Dirac sea considerado por una mayoría de físicos como más fundamental, puesto que es el que funciona en Física de alta energía, y se supone que los mesones, quarks y otras partículas fundamentales obedecen a principios relativistas, se utilizan modelos no relativistas a efectos prácticos, aunque no permitan la transformación de energía en masa. Tampoco parece una tarea sencilla unificar los modelos, pues obedecen a principios muy distintos. Sin embargo, Giere (*ibíd.*, p. 224) cita el caso de un teorema de equivalencia entre el enfoque de Dirac y el de Schrödinger, al que básicamente se le añadiría una corrección de Lorentz. La equivalencia no significa unificación teórica, sino la predicción de los mismos resultados de observación.

Tampoco la falsabilidad es un requisito para el realismo constructivo. El modelo original de Schrödinger, por ejemplo, para un potencial de 500 MeV protones en el Calcio 40, fue rechazado porque no se acomodaba a los datos. Pero esto no significa que se rechace toda la familia. Los modelos se modifican y se revisan, teniendo en cuenta otras consideraciones, y esto puede ocurrir precisamente cuando hay nuevos datos que necesitan ser interpretados. No son hipótesis *ad hoc*¹⁷³.

Por último, y con respecto a la simplicidad, Giere (*ibíd.*, p. 225) no piensa que un modelo pueda exhibir mucha más simplicidad que otro, por lo que no sería un criterio decisivo para la elección, a la hora, por ejemplo, de elegir el modelo de Dirac frente al de Schrödinger, supuestamente mucho más complejo. La simplicidad parece que tiene que ver más con la subjetividad del científico:

In sum, the point of the appeal to simplicity is to cut down the number of models in one or another of the rival approaches so that a satisfactory decision is at least possible.

¹⁷³ Cf. *ibíd.*, p. 223.

VI. MODELOS SEMÁNTICOS

6.4. Crítica de la similaridad (II)

A mi juicio, el análisis de los modelos de Giere es más satisfactorio que el de van Fraassen, y, en general, que otros análisis semánticos. Estas son mis razones:

1) Giere considera que la ciencia no es un espejo de la naturaleza. Es decir, rechaza el isomorfismo. Los modelos son más o menos apropiados, sin que nunca “encajen” totalmente. Hay grados de aproximación y siempre hay un error. El modelo funciona dentro de cierto margen de error, a partir del cual se considera insatisfactorio.

2) Se muestra particularmente en contra de las “generalizaciones empíricas”. A ningún modelo, a ninguna ecuación, se llega “generalizando”. Hace falta algo más para establecer un modelo: talento científico. Los datos discretos de la naturaleza, las medidas, no pueden “generalizarse”. Los modelos, especialmente los que se refieren a leyes fundamentales, son muy difíciles de construir.

3) Giere (*ibíd.*, pp. 98-80) reconoce que los modelos varían en generalidad y en nivel de abstracción. Un oscilador lineal es una familia de modelos, donde no todos se sitúan en el mismo nivel. Además, rechazar uno de ellos no significa que todos queden refutados. Acepta que es posible mejorar los modelos.

4) Reconoce explícitamente que hay una serie de datos empíricos que se consideran verdaderos. Es lo que yo vengo llamando el primer grupo de enunciados aceptados, **D**, los enunciados de observación.

5) Rechaza el empirismo constructivo de van Fraassen, especialmente en lo que se refiere a la distinción observable-inobservable. Una de estas razones es que, efectivamente, no aparece en ningún texto científico. Otra razón que señala es que la ciencia no indica las partes “no reales” de sus teorías. Por mi parte, he señalado que la ciencia sólo se ocupa de lo observable, en el sentido de experimentable y detectable. Pero no sólo eso: admite que todos los términos tienen el mismo carácter, por lo que no hay algunos

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

que sean más fundamentales que otros. Desde el punto de vista del análisis dimensional, que es el que yo defiendo, ninguno es más fundamental que los demás.

6) Giere piensa que se necesita “información adicional” para juzgar los avances científicos en aquellas áreas donde se está investigando. Para mí, y en relación con la polémica “entidades observables-entidades inobservables”, o a la validez limitada de los modelos nucleares, quiere decir que hay que dejar trabajar y no creer que nuestro estado actual de conocimiento vaya a durar sempiternamente.

Dicho esto, paso a indicar mis razones en contra de su realismo constructivo, incluyendo la noción de similaridad:

1) A pesar de su escepticismo en relación con la verdad de las leyes científicas, y de que piense que “la verdad no tiene relevancia epistemológica”, lo cierto es que los modelos no se construyen de la nada, sino a partir de teorías. ¿Gracias a qué, si no, un modelo gravitatorio de Newton es capaz de predecir resultados? ¿No será en virtud de las leyes que lo construyen?; porque sin leyes, precisamente, no hay modelos. Porque sin entrar a valorar la verdad o la falsedad de una ley de forma absoluta, lo cierto es que desde el punto de vista metodológico, instrumental, que es el que yo estoy defendiendo, una ley, o un conjunto de ellas, es lo que hace posible la construcción del modelo.

Tener por verdadera una ley, hasta que no se demuestre lo contrario, no es un ejercicio metafísico, una vez que se entiende qué hace y qué no hace la ley. Porque un modelo tiene que tener *alguna ecuación*, algo que se manifieste acerca de las magnitudes que intervienen en el fenómeno. O esa ecuación se obtiene a partir de los datos experimentales, o llega derivada desde los pilares fundamentales de la teoría. En cualquier caso, una ley, tal y como he venido defendiendo, no es más ni menos que una ecuación, por muy complicada que ésta sea. Eso es lo que yo entiendo por una ley: una función que arroja resultados para las variables que se desean estudiar; un *algoritmo*, para que se me entienda. Es decir, que sin ley no hay un cálculo, no hay una función, no hay un modelo. Desde este punto de vista, que es el que se utiliza en Física, no sé por qué hay que cambiarle el nombre a la ley, y llamarla “regularidad” o “uniformidad”, palabras con mucha más carga metafísica de las que se supone.

VI. MODELOS SEMÁNTICOS

La ley vincula estados y magnitudes, ni más ni menos, y subrayar la importancia de los modelos frente a las leyes, como hace Giere, es separar cosas que no se entienden la una sin la otra. Porque, ¿dónde va una ley, por sí sola, si no hay un modelo que le especifique las condiciones de un fenómeno particular? ¿Y dónde va un modelo sin leyes? ¿A “resumir”, a “generalizar”, a “predecir”? ¿Y cómo va a predecir sin ecuaciones? Reitero que la “modelización” no es ni mucho menos diferente de la “teorización”, y que una cosa no puede darse sin la otra¹⁷⁴.

2) Giere piensa que los modelos no se desarrollan deductivamente, y que su unidad es más bien “orgánica” que “deductiva”. Sin embargo, no todos los modelos están fundamentados de la misma manera. Dentro de los modelos de un oscilador lineal, algunos de ellos, los más básicos, son el punto de partida para los más complejos. Dependiendo de las simplificaciones y suposiciones que se hagan acerca de un modelo básico, el modelo estará más o menos justificado. No todas las hipótesis son igual de buenas, ni todas valen lo mismo; hay algunas mucho más arbitrarias que otras. Hay que tener mucho cuidado cuando se desciende de una ecuación como la de Schrödinger. No todas las simplificaciones están igual de justificadas; al final, se va a notar en los resultados.

Puede que exista una “familia” de modelos, pero, si se me permite la expresión, no todos mandan igual; no es una “familia democrática”, donde todos se sitúen al mismo nivel. La idea que una ciencia tiene de sí misma, a la hora de explicar a los aprendices sus fundamentos, por ejemplo, es fuertemente deductiva: se enseña a valorar unos modelos sobre otros, y a comprender por qué unos están más justificados que otros. Se les enseña que la “familia” se obtiene a partir de hipótesis sobre ecuaciones fundamentales, de forma deductiva. De otra manera, ¿cómo se iba a desarrollar la ciencia? ¿Se muestran todos los modelos a la vez y se dice: “escoged el que más os guste”? ¿Qué profesor, o qué estudiante de Física sería el que pensara semejante cosa? Porque los modelos se argumentan, se justifican, *se ve de dónde vienen*, y lo primero que se hace es indicar las leyes fundamentales que se van a considerar verdaderas. Después, se van particularizando, o complementando.

¹⁷⁴ Giere dice que no hay “razones objetivas” para caracterizar a los modelos. Desde luego que, sin leyes, poco podemos decir de los mismos. Porque justamente es a partir de las leyes que utilizan como se les caracteriza: modelos *relativistas* del Universo, modelos *cuánticos* de electrón, modelos *newtonianos* de los planetas...

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Los departamentos de la ciencia no están aislados; se escuchan mutuamente. Los científicos conocen qué teoría es la más precisa: para eso la han estudiado. No meten todo en el mismo saco y lo van sacando donde les conviene. Esta situación, aunque divertida, sería una completa pérdida de tiempo. La ciencia guarda sus leyes fundamentales como su mayor tesoro, como su máxima conquista. Y trata de deducirlo todo a partir de ellas. Si en algún momento no se puede, cuando no hay más remedio, entonces se construyen modelos con hipótesis de más bajo nivel, **H**, que en casos muy excepcionales pueden llegar a reformar todo el edificio científico. Pero eso siempre ocurre como último recurso. Un científico prefiere hacer cosas fundamentadas a no hacerlas. Las “preferencias psicológicas”, los “gustos” que puedan tener a la hora de escoger una teoría frente a otra, eso no cuenta: lo que cuentan son los resultados, y si uno quiere seguir empeñándose en utilizar modelos de bolas de billar en vez de acudir a la ecuación de Schrödinger, allá él. Al final, con el tiempo, no va a tener más remedio que escribirla, si lo que quiere es llegar a algún resultado.

La unidad “orgánica” de la que habla Giere tiene que ser forzosamente deductiva; es decir, jerárquica. En un organismo, todo se supedita a la función general, y lo mismo ocurre con los modelos. Porque a la hora de mejorar un modelo, a la hora de rechazar algún aspecto de un modelo que no resulta eficiente, las decisiones no se adoptan alocadamente, sino en función de prioridades. Qué dato o qué ecuación se abandona, para realizar una versión mejorada del modelo, se decide en función de la importancia de las ecuaciones y de la fiabilidad de los datos. Depende, efectivamente, de qué se considera más fundamental, y eso es porque implícita o explícitamente se ha admitido una jerarquía de leyes, de modelos y de datos, en lo que toca a confianza, seguridad y fiabilidad. La corrección exige una decisión, y ésta un orden de prioridades.

3) Aunque Giere reconoce que los modelos no forman parte de las teorías, y que por lo tanto no se pueden definir “extensionalmente”, creo que se equivoca al suponer que en una teoría tienen que existir afirmaciones como “hay cierto grado de similaridad entre este sistema de la realidad y la ecuación de Schrödinger”, o “hay cierta similaridad entre un modelo de Newton basado en la inversa de la distancia al cuadrado y las afinidades entre átomos, o entre las mareas”. Semejantes enunciados se efectúan siempre *a posteriori*, una vez realizada la comparación, y no tienen nada que ver, en principio, con los pilares fundamentales de una teoría. Cuando se compara las predicciones de un mo-

VI. MODELOS SEMÁNTICOS

delo con los datos de observación, y se decide si es “bueno, malo, satisfactorio, no definitivo, etc.”, el mayor o menor margen de error que el modelo comete no pasa a formar parte del “núcleo” de la teoría, por emplear la expresión de Lakatos. Los éxitos y desaciertos de una teoría, sus “similitudes”, no tienen nada que ver con lo que es una teoría en sí misma, la cual no va acarreado sus éxitos y sus fracasos como si fueran parte de sus ecuaciones.

Las “hipótesis teóricas” son un resto de las aplicaciones paradigmáticas de Kuhn que nunca han caracterizado ni caracterizarán a una teoría. Bastante tiene un científico con modelizar los datos para preocuparse por establecer similitudes entre sus ecuaciones y el mundo. La teoría es algo potencial, y su aplicabilidad no está dada de una vez para siempre; se investigan posibles dominios de aplicación; las similitudes, en todo caso, se van estableciendo, y pasan a incorporarse a la serie de modelos que se obtienen deductivamente a partir de sus ecuaciones fundamentales. Cuando una teoría tiene éxito en predecir el comportamiento de un fenómeno relativamente nuevo, eso no cambia la teoría; en todo caso, fortalece la creencia en su verdad (aunque esta creencia, desde luego, nunca pueda expresarse con un “número”). El modelo generado por la teoría y que es capaz de explicar un fenómeno, se obtiene deductivamente, mediante distintas hipótesis que se adaptan a la naturaleza concreta del fenómeno. Ese modelo, cuando, por así decirlo, queda archivado, no lo hace en igualdad de condiciones con los modelos más fundamentales, sino que se sitúa por debajo, puesto que se ha construido con hipótesis auxiliares, y no directamente a partir de los modelos más abstractos, donde el número de suposiciones es mucho menor.

Las ecuaciones del campo gravitatorio de Einstein conforman una teoría, donde las posibles aplicaciones y similitudes no están ni mucho menos decididas: por eso mismo no pueden formar parte de los pilares de la teoría. La búsqueda de las aplicaciones, de las similitudes, se efectúa desde *fuera*; es una cosa distinta. Se trata, en este caso, de buscar confirmaciones. Pero la teoría ya está escrita, no tiene más. Incluso cuando una teoría se modifica a partir de ciertos resultados experimentales contrarios a las predicciones, el resultado de esa modificación va a seguir siendo un conjunto de ecuaciones, a los que no se añade el mayor acuerdo o desacuerdo que presenten con la realidad.

Al fin y al cabo, el papel de las hipótesis teóricas, según Giere, es especificar *grados de similitud* entre el modelo y el sistema modelado. Estas hipótesis indican hasta qué punto se parecen el sistema real y la representación. Pero, ¿qué significa esto?

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

¿A qué se refiere una comunidad de científicos cuando dicen que tal modelo y tal sistema real se parecen “mucho”, “poco”, o “nada”? ¿No se están refiriendo al *error*, a la *desviación* de las predicciones con los datos de observación? ¿No están aludiendo, en definitiva, al mayor o menor *ajuste* que el modelo muestra con la realidad? En tal caso, ¿deben incluir las teorías los errores promedios de cada una de sus aplicaciones? Porque esto es lo que significa que las hipótesis teóricas formen parte de la teoría.

Pero entonces, ¿debe incluir la teoría de Galileo sobre la caída libre de los cuerpos el porcentaje de error señalado en la quinta columna de la *Tabla 6.1*? ¿Y por qué esta tabla, por qué esta serie de medidas, y no otra? ¿Qué fenómeno hemos de fijar de una vez por todas para que las teorías presentes y futuras acudan a él para descubrir e incorporar a la teoría su grado de similaridad? Obviamente, una cosa es la teoría y otra sus aplicaciones, confirmaciones, rechazos y “similitudes”¹⁷⁵.

4) Al hilo de lo anterior, el parecido, según Giere, es en “algunos” aspectos. Pero, ¿en cuáles? Giere señala que la similaridad puede variar de un fenómeno a otro, y que exige un estudio particular caso por caso. A veces piensa que los científicos son quienes tienen que decidir dónde es similar el modelo a la realidad, y dónde no lo es. En este sentido, habla del “acuerdo social” de una comunidad de científicos a la hora de decidir qué es la similaridad en cada caso. ¿Está diciendo Giere que la similaridad es por “consenso”? ¿Están todos los científicos de acuerdo, caso por caso, en los aspectos del modelo que son similares a los de la realidad? ¿Votan todos a la vez, o el voto de algunos científicos vale más que los demás? Porque sus opiniones pueden ser radicalmente diferentes, y donde algunos ven similitudes otros sólo ven, a lo sumo, coincidencias, casualidades. ¿Se trata de incorporar, como sea, la sociología de la ciencia al análisis lógico de las teorías? ¿No es posible un análisis interno, metodológico, que no haga referencia al “acuerdo social”? ¿No está determinado el acuerdo por razones *objetivas*?

Sin embargo, en otras ocasiones, cuando se refiere a la similaridad entre los modelos de la Mecánica Clásica y aquellos sistemas donde más o menos funcionan, Giere habla de una comparación de aspectos tales como las “posiciones” y la “velocidad”. Aquí se aleja abiertamente del “lenguaje social” de los científicos y apuesta decididamente por una comparación entre dimensiones, entre propiedades físicas, entre magni-

¹⁷⁵ Si se afirma que los modelos no tienen que formar parte de las teorías, ¿por qué introducir ahora el grado de similitud entre los modelos y la realidad como parte esencial de las mismas?

VI. MODELOS SEMÁNTICOS

tudes experimentables. Los modelos serían semejantes a los sistemas reales porque dicen cosas que están en la naturaleza, porque se pronuncian sobre algo objetivo que nosotros no ponemos en las cosas, sobre algo que no está aún decidido, que no conocemos, y que podemos averiguar experimentando. Los modelos se parecen a la realidad porque hablan de ella. Esto tiene más sentido.

Nuestro objetivo final es resolver la esencia de la similaridad partiendo de bases puramente metodológicas: ¿qué aspectos de la realidad se *comparan* con el modelo? ¿Por qué se parecen? Un breve experimento mental podrá aclarar la esencia de la similaridad, y comprender que no es nada más que un *isomorfismo camuflado*.

Sea un fenómeno F con dos dimensiones físicas relevantes, $[d_1]$ y $[d_2]$, representadas por las variables v_1 y v_2 . Tras una serie de experimentos, se obtiene la siguiente tabla de medidas que muestra el comportamiento relativo de una variable respecto de la otra (*Figura 6.1*):

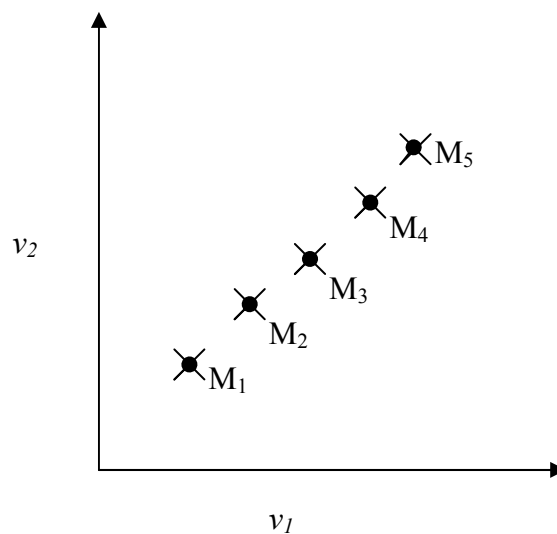


Figura 6.1

Aquí tenemos una serie de medidas M_1, M_2, \dots, M_5 , de v_2 en función de v_1 . Estos datos han sido recogidos de acuerdo con el instrumental de nuestra época. Hemos aislado al máximo el sistema, y hemos sido especialmente cuidadosos de que ninguna otra dimensión pudiera intervenir en el sistema. También hemos calculado una incertidumbre en la medida de nuestros aparatos, un error aproximado de \pm cierta cantidad. Nuestros datos son *fiabiles*, y así lo acepta la comunidad de científicos. Los hemos publicado

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

en una revista donde especificamos los procedimientos experimentales que hemos seguido para obtener los datos. Digamos que, más o menos de forma inmediata, nuestros enunciados de observación pasan a ser considerados verdaderos, es decir, pasan a formar parte de lo que he llamado, desde el principio, el primer conjunto de enunciados aceptados, **D**, que consisten en una serie de variables, que representan ciertas dimensiones, a las cuales se les asigna por medio de un signo de igualdad un número seguido de ciertas unidades al que añade un pequeño margen de error¹⁷⁶.

Un primer físico, de orientación fundamentalmente matemática, lee nuestro artículo y se pone a buscar el modelo matemático que genera todos estos datos experimentales. En este caso, el físico no haría falta que fuera demasiado eminente para darse cuenta de que la serie de medidas es generada por una recta de cierta inclinación α , tal que

$$y - y_0 = \operatorname{tg} \alpha (x - x_0)$$

Ya que α , en nuestro caso, vale 45° , y que tanto y_0 como x_0 son iguales a 0, la ecuación general quedaría:

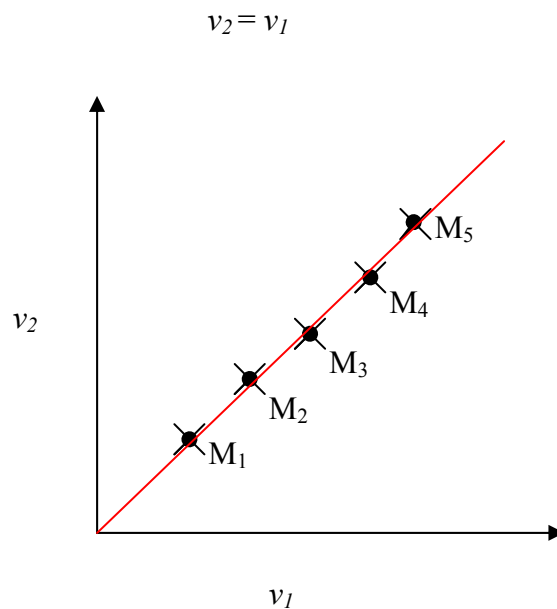


Figura 6.2

¹⁷⁶ Por supuesto, en el número va incluida la precisión de la medida, que se averigua contando su número de decimales.

VI. MODELOS SEMÁNTICOS

Como se aprecia en la *Figura 6.2*, este físico matemático ha encontrado un *modelo teórico de datos*, una función que es capaz de generar todos los datos considerados como verdaderos, y, además, puede generar muchos otros datos, prediciendo multitud de valores que pueden ser probados experimentalmente¹⁷⁷. Dos apuntes hay que destacar: a) El modelo, como ya he expresado antes, hace mucho más que resumir: va más allá, y predice, porque sintetiza la información. b) Como se aprecia en la figura, los datos nunca concuerdan exactamente con el modelo; hay un margen de error, muy sencillo de calcular. El modelo nunca “encaja”; se aproxima, más o menos.

Gracias al modelo, ya hay una serie de predicciones que alguien tendrá que comprobar. Aquí intervenimos de nuevo nosotros, los físicos experimentales. Efectuamos una serie de medidas en aquellos valores predichos por el modelo de datos que son accesibles técnicamente. Supongamos que nuestros resultados son más o menos positivos y concluimos que la función modeliza el fenómeno, allí hasta donde nosotros somos capaces de discernir. ¡El modelo no se ajusta del todo, pero los resultados son optimistas! Pensamos: “¡En algo se parecen!”

Mientras tanto, un físico teórico ha leído todos estos artículos y procede a tratar de derivar la función, el modelo matemático (el *data model*, en terminología de Suppes), a partir de modelos más abstractos y de leyes mucho más fundamentales. Para ello, realiza simplificaciones, transforma ecuaciones, hace suposiciones, utiliza todo tipo de datos, establece leyes-puente -que le permitirían mediar entre el modelo matemático y las leyes más abstractas... Este es el trabajo más difícil, el más arduo, y para el que no existen ningún tipo de reglas *a priori*. Para llevarlo a cabo, bastan un cuaderno, un lapicero... y ciertas dosis de genialidad y paciencia.

Supongamos que logra su objetivo: la teoría ha salvado las apariencias. ¡Un nuevo triunfo para el conjunto de enunciados teóricos aceptados, **T**, aquellos que se consideran verdaderos! ¡El modelo de datos no sólo se parece a la realidad, no sólo salva las apariencias; además, está justificado teóricamente!

Pero el tiempo pasa, y los instrumentos de medida se han hecho mucho más precisos. Otra serie de mediciones efectuadas sobre el fenómeno *F*, entre nuestras dos prime-

¹⁷⁷ Es exactamente el mismo método que el utilizado para modelizar las posiciones de los planetas en función del tiempo, que vimos en el Cap. II. Pero los modelos, desde luego, eran bastante más complicados.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

ras medidas originales M_1 y M_2 , han dado lugar a la siguiente tabla empírica (*Figura 6.3*):

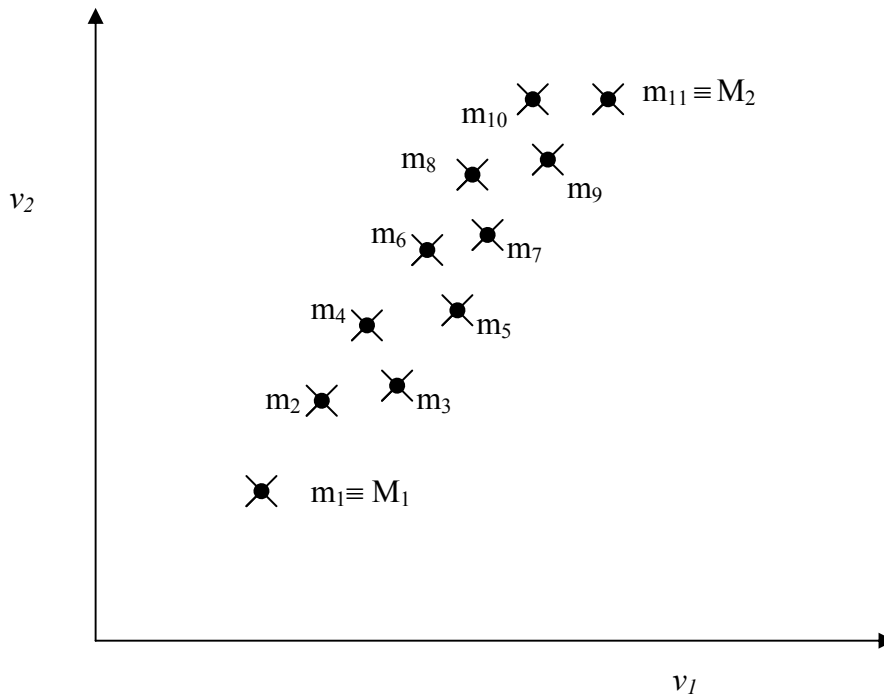


Figura 6.3

Las primeras medidas que nosotros realizamos no eran tan precisas como las que tenemos ahora. Nosotros, dentro del área del fenómeno donde se producen las nuevas medidas, sólo podíamos medir M_1 y M_2 . Pero ahora un grupo de experimentadores ha ido más allá y ha efectuado una serie de medidas mucho más precisas que se concentran entre M_1 y M_2 . ¡Lo que era una recta ahora no se sabe muy bien qué es! ¡El modelo de datos no se parecía tanto como se suponía! De hecho, se parece bastante poco a la realidad...

Cierto pesimismo cunde. El modelo no funciona nada bien para estos nuevos datos disponibles. Su margen de error ha subido considerablemente. Su similaridad... casi ha desaparecido.

Pero he aquí que otro físico con una base matemática muy fuerte es capaz de encontrar *otro* modelo de datos para las nuevas medidas. Su solución (*Figura 6.4*), una función seno girada 45° desde el eje de las abcisas:

VI. MODELOS SEMÁNTICOS

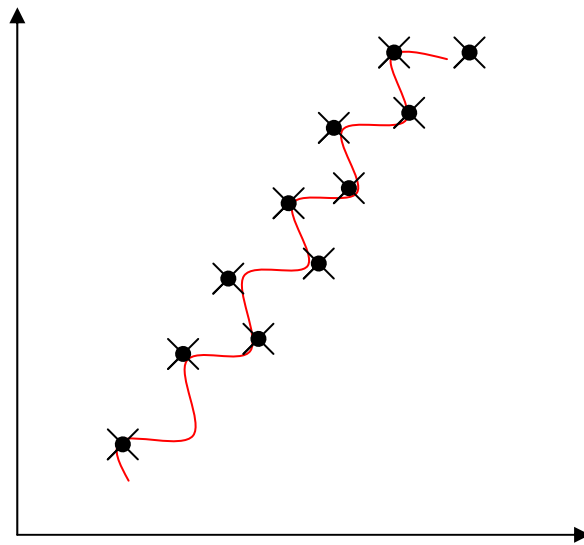
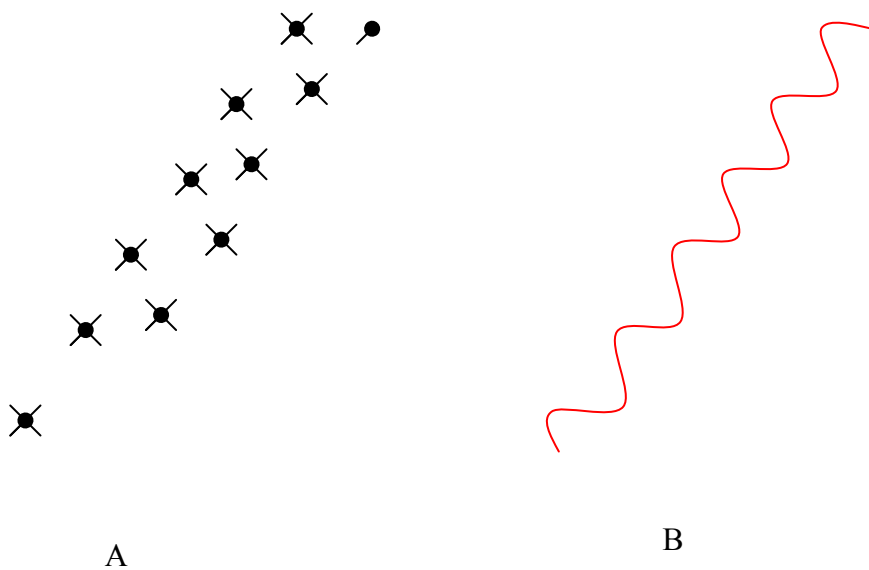


Figura 6.4

Aquí nos encontramos con un modelo de datos capaz de “salvar las apariencias” de nuevo, y de forma muy satisfactoria, aunque nunca de manera exacta. Los defensores de la similaridad podrán salir de su escondite y exclamar que hay un parecido entre el modelo y la realidad, puesto que ambos sistemas se parecen.

Pero la pregunta fundamental es: *¿en qué se parece una serie de medidas a un modelo teórico de datos?* Es decir, *¿en qué se parecen A y B?*:



MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

En A tenemos un conjunto discreto de datos; en B tenemos una función continua y diferenciable: *¿son ambas cosas comparables? ¿Por qué se dice que existe una similitud entre los sistemas de A y de B, si A no es ningún sistema?*

En un conjunto de datos no hay ningún sistema, ninguna estructura, ninguna *forma*. ¿Por qué se sigue hablando una y otra vez de cosas que no son comparables? La realidad, repito, no tiene sistemas. La expresión “sistemas reales” es un absurdo. Cuando se miden el número de impactos de ciertas partículas, no se dibuja ningún sistema, ningún modelo; sólo se proporciona información básica *sin estructurar*. La información está en el ordenador, pero el modelo, el *patrón* al que más o menos responden esos impactos, tenemos que ponerlo nosotros. La realidad nos suministra datos discretos, valores para los momentos en que medimos. *La naturaleza, por sí sola, no tiene sistemas: eso es algo que suponemos nosotros antes de construir los modelos.*

Pero si alguien sigue empeñado en decir que A y B son similares en algo, *afirmo que el único parecido que puede encontrarse en ambas cosas está en los puntos que comparten, es decir, en los datos discretos, en las medidas, por las que más o menos pasa la función que hemos escogido*. Es decir, que lo único que comparten A y B son los puntos que ya están presentes en A y que ahora B más o menos es capaz de generar matemáticamente. Un isomorfista diría: “Esos puntos son los mismos”. Pero está claro que no son los mismos. Por eso un defensor de la similaridad diría: “Esos puntos son *casi* los mismos”. ¿Y en esto se parecen? ¿Es éste el misterio de la similaridad? ¿En decir lo mismo que el isomorfismo, pero luego añadir: “no exactamente”? ¿No será que establecen una biyección, un isomorfismo, y luego dicen: “pero un poco estropeado”?

Así que en realidad la similaridad camufla un isomorfismo que luego, como si fuera la escalera del *Tractatus* de Wittgenstein, se tira cuando ya se ha llegado arriba. Aquellos que encuentran “parecidos” entre nuestros modelos y el mundo establecen un isomorfismo entre los puntos de las medidas y los puntos de la predicción, y luego le añaden a los puntos de la realidad un entorno de “error”, un círculo de radio “error permitido” donde pueden caer las flechas desde el conjunto inicial. Pero eso, en esencia, es suponer un sistema exacto de la realidad, un sistema inalcanzable, ideal, al cual nunca se llega pero tras el cual se corre. Por eso, cuando se dice que un modelo *simula* un fenómeno (palabra que yo mismo he empleado en el Cap. II, aunque entrecomillada) lo que se está queriendo decir es que hay un sistema que más o menos responde al sistema

VI. MODELOS SEMÁNTICOS

de la naturaleza, un sistema último que nadie ha visto ni verá, pero que actúa como punto de criterio decisivo para la comparación del modelo con la realidad.

Detrás de la simulación se escondería, entonces, la regla suprema metodológica de la ciencia: *actúa como si la realidad fuera un sistema y tú te pudieras acercar a él*. Esta es la suposición básica, el fundamento de la ciencia, el descubrimiento de Kant.

La representación parte de una premisa indemostrable: que hay un sistema en la Naturaleza, al cual obedecen todas las cosas. La ciencia, en este sentido, es un acto de fe; es una creencia última que impulsa a la representación.

El realista cree que nos acercamos a la Verdad, al Sistema Último; el instrumentalista piensa que eso es un juicio de valor, metafísico, no justificado. Por eso un instrumentalista, lo primero que tiene que hacer es rechazar tanto el isomorfismo como la similaridad. Un instrumentalista que defendiera el parecido entre nuestros modelos y el mundo se estaría traicionando a sí mismo; estaría admitiendo el isomorfismo, pero camuflado.

Sin embargo, la ciencia progresa. Sabe muchas cosas, y cada día más. ¿Hacia dónde se dirige ese progreso? La sucesión de modelos cada vez más y más precisos, ¿tiene un límite? Y si no lo tiene, ¿a qué estamos jugando?

6.5. Recapitulación

La representación científica caracteriza los fenómenos mediante una serie de indicadores que resumen el aspecto o forma que interesa destacar de ellos. Estos indicadores son parámetros objetivos que permiten esquematizar lo esencial de los fenómenos a través de leyes que los vinculan entre sí por medio de una fórmula u operación. El sistema que resulta de la representación configura una serie de estados permitidos del fenómeno, una serie de “posiciones” ligadas entre sí mediante reglas, algoritmos o leyes capaces de obtener un estado particular a partir de una serie de condiciones iniciales. Una predicción, en este sentido, es una salida del sistema como respuesta a la asignación de un número a ciertos indicadores, a partir de ciertos enunciados de observación considerados verdaderos. Con las hipótesis auxiliares, simplificaciones, correcciones y aproximaciones se persigue simplificar la forma matemática del sistema, sin que en ningún momento formen parte esencial de la teoría, para que el científico pueda elaborar cálculos a

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

partir de los cuales establecer predicciones y comprobar hasta qué punto se ajustan a una serie de medidas objetivas, efectuadas con independencia de la teoría o hipótesis que han permitido construir el modelo. De acuerdo con los análisis de Suppe, Suppes y van Fraassen, con los que coincido esencialmente en este punto, la representación describe idealmente el fenómeno, y lo define como una trayectoria en el espacio n -dimensional de ciertas coordenadas, como una sucesión de estados ordenados en el tiempo por donde va pasando el fenómeno a través de sus cambios. Las leyes no son más que configuraciones impuestas al espacio-fase, y las teorías se diferencian entre sí por los valores permitidos y prohibidos dentro del espacio abstracto que caracterizan. El modelo es “adecuado” (o más bien “aceptable”) cuando observación y predicción concuerdan dentro de un margen de error.

Ahora bien, esto no nos da derecho a definir nuestra representación como isomórfica con el mundo, ni siquiera en los modelos que supuestamente son más empíricos que otros y se limitan a “salvar las apariencias”. En particular, ninguna “apariciencia” puede ser isomórfica con las subestructuras empíricas de un modelo, cualesquiera que sean las propiedades físicas que se consideren, por la sencilla razón de que *la naturaleza no es accesible en su totalidad a través de la medida*, y no existe ninguna garantía de que el modelo haya conseguido reflejar parte de la realidad. Nuestras medidas operan *discretamente*, y proporcionan una serie de puntos que han de ser incluidos (con mayor o menor acierto) dentro de un modelo de datos que sea capaz de *generarlos*. La representación hace de lo discreto un continuo con el fin de que no sólo las medidas originales sean computables, sino que sea posible avanzar más allá prediciendo nuevos estados del sistema que podrán ser comprobados con posterioridad. El modelo *no* es un resumen de las medidas disponibles; va mucho más allá de los datos iniciales y calcula nuevos valores para las variables relevantes. El modelo es una *síntesis* que no se dedica a copiar la realidad, ni la resume, ni resulta parecida en algunos de sus aspectos; es una serie de ecuaciones que proporciona al mundo una estructura que de por sí no tenía. La suposición inicial es que es posible encontrar un *mecanismo*, una fórmula, un modelo, que al tiempo que es capaz de generar los datos de observación disponibles los *unifique* en un sistema que permita computar otros datos.

Por otra parte, las teorías de la Física no designan como “inobservables” ninguna de las partes de su imagen. No hay algo así como una estructura puramente formal a la que se añaden componentes empíricos que relacionan la teoría con la realidad. Aunque

VI. MODELOS SEMÁNTICOS

para calcular pueda ser necesario simplificar, eso no significa que las ecuaciones fundamentales no se refieran a la realidad empírica en todo momento. La matemática está incluida en la proporción que las magnitudes físicas guardan entre sí, y no constituye algo independiente de la parte empírica de la teoría. Es decir, que no hay componentes extraños, ni excedentes “ontológicos” dentro de las teorías. De ser así, los propios físicos ya se habrían encargado de haberlos eliminado. Más aún, y con relación a las entidades postuladas por la ciencia, *cuando se investiga la existencia de algo, se supone que existe, no que no existe, o que sea “inobservable”*: la ciencia no designa como inobservable nada; en todo caso, a lo sumo, como *dudoso*: pero por eso se está investigando. De hecho, la sola postulación de una entidad indica que *ya* se ha detectado algo (éste es el sentido de lo “observable”), y que se busca una explicación. Aceptar provisionalmente la existencia de cierta entidad significa, precisamente, que se postula una serie de causas que expliquen los efectos que ya se han observado. Aun así, aceptando que haya una mayor o menor provisionalidad de las entidades, eso no significa que todos los objetos o sistemas, dentro de la Física, no sean tratados de la misma manera. *El método es el mismo*, ya sea para las micropartículas del núcleo, para objetos interestelares o para mesas y sillas. Los objetos físicos son nombres lógicos para los que se particulariza el valor de ciertas magnitudes, y no se distinguen metodológicamente por sus órdenes de magnitud.

En relación con el orden y la posición que los modelos adquieren dentro de la ciencia, he defendido, frente a Giere, que existen distintos *niveles de fundamentación* de los modelos, dependiendo de las teorías, leyes o hipótesis que los construyen. Las mejoras, correcciones y nuevas versiones son posibles porque se establece un *orden de prioridades*, a la hora de decidir qué enunciados se rechazan y cuáles se mantienen. A fin de cuentas, es una cuestión de *fiabilidad*, de confianza. También he rechazado que las teorías deban incluir los “grados de similaridad” o promedios de error con referencia a los sistemas reales. Una cosa es la teoría, las ecuaciones, y otra son sus aplicaciones, confirmaciones, “refutaciones” y similitudes.

Por último, he definido la noción de similaridad como *“isomorfismo camuflado”*. En realidad, los defensores de la semejanza o parecido entre nuestros modelos y el mundo lo que hacen es suponer un isomorfismo que luego rechazan al comprobar que la correspondencia entre predicciones y medidas nunca son exactas, y siempre tienen asociadas un margen un error. Hay un conjunto de datos de observación aceptados que

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

constituyen el *explanandum* para el cual hay que elaborar un modelo. Un modelo teórico de datos puede generar esas medidas y pronunciarse sobre otra serie de predicciones que podrán comprobarse posteriormente, de acuerdo a las posibilidades de la ciencia en cada momento. *Pero en un conjunto de medidas no hay ningún sistema, ni estructura, ni nada que pueda compararse a la representación posterior.* El patrón, la forma, es algo que ponemos nosotros. En lo único que se parecen el modelo y la realidad es en el mayor o menor ajuste a las medidas experimentales, y en nada más. *Decir que el modelo y la representación son “similares” es decir lo mismo que decir que el modelo “salva las apariencias”.* La similaridad, entonces, es reducible al *grado de aceptabilidad* o *utilidad* que un modelo tiene a la hora de generar las medidas para las que ha sido construida. Pero siempre es posible imaginar o construir otro modelo que se ajuste más a los resultados experimentales, y decir que este modelo es *más* similar que los anteriores. El isomorfismo es un *ideal* inalcanzable, una suposición nuestra: el *aumento en el detalle* trae consigo modelos más precisos que tratarán de fundamentarse desde un punto de vista teórico o que acabarán *reinterpretando* las leyes conocidas a partir de nuevas ecuaciones más fundamentales. La verdad, en todo caso, es una cuestión de *precisión*.

CAPÍTULO VII

ANÁLISIS PRAGMÁTICOS DE LA REPRESENTACIÓN¹⁷⁸

7.0. Introducción

Por análisis pragmáticos de la representación entiendo, fundamentalmente, aquellos que, o bien consideran que las leyes fundamentales de la teoría no intervienen en el contenido empírico efectivo de la teoría, o bien las relegan a un papel secundario, meramente auxiliar, con relación a las leyes causales de bajo nivel que serían las que realmente soportarían el edificio empírico de la ciencia. El objetivo fundamental de este capítulo, a través de la crítica de estos análisis, es defender el papel de las leyes fundamentales como herramientas *imprescindibles* para la construcción de los modelos que permiten avanzar en el conocimiento de la naturaleza.

La Sección 7.1: “Representación e intervención”, analiza las aportaciones de Ian Hacking (1996) en su defensa de un realismo de entidades basado en la intervención efectiva o manipulación sobre la realidad, frente al carácter puramente representativo y explicativo de las grandes teorías científicas. Hacking resalta el papel independiente de la experimentación y la ingeniería en contraposición a las teorías de la referencia que hacen que el significado de una entidad dependa de los principios teóricos donde está inmersa.

En la Sección 7.2: “Objeciones al realismo experimental”, critico la separación entre teoría y experimento y defiendo la doble justificación, empírica y teórica, de los modelos, que a mi juicio resuelve el problema de la subdeterminación empírica, al ampliar el alcance del dominio donde se produce la incompatibilidad y la equivalencia empírica.

¹⁷⁸ Quiero agradecer a Mauricio Suárez su amabilidad al invitarme a su curso de doctorado “Realismo de las entidades teóricas”, celebrado en la Universidad Complutense de Madrid durante los meses de enero y febrero de 2003.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Me opongo a la división en compartimentos estancos de la ciencia, donde sólo valdrían determinadas leyes relativamente excluyentes entre sí, y subrayo que la labor de sistematización científica no sólo incluye la diversificación, sino también la unificación, a través de leyes más generales que sintetizan el contenido empírico de las de menor nivel de abstracción. Por último, dentro de este apartado, me opongo a que el causalismo sea considerado como algo que hay que añadir a las teorías o leyes científicas para que éstas describan con veracidad lo que ocurre en la naturaleza. Defiendo que el causalismo, en Física, simplemente indica la interacción mutua entre dimensiones fundamentales, y que tan causales son, en este sentido, los modelos de Ptolomeo como los modelos de la Teoría General de la Relatividad.

La Sección 7.3: “Descripciones fenomenológicas”, estudia la distinción que Nancy Cartwright realiza entre leyes fenomenológicas, como aquellas que realmente describen los fenómenos, y leyes fundamentales, como aquellas que explican el contenido empírico de las anteriores. Si hay alguna verdad, para Cartwright, ésta se encuentra en las aproximaciones, en las leyes fenomenológicas, no en la teoría de fondo. También apuesta por una variedad de leyes de bajo nivel mientras que afirma que los poderes unificativos de una teoría no hablan a favor de su verdad, sino en todo caso de su falsedad. A continuación estudio el papel de los modelos dentro de su filosofía, los cuales no son representaciones literales de cómo son las cosas, ni son deducibles de las teorías en las que están inmersos. Cartwright destaca el uso de modelos inconsistentes, así como la relativa permanencia y veracidad local de ciertos modelos, mientras que la teoría puede llegar a descartarse. Por último, expongo brevemente su defensa del causalismo, y la creencia en la existencia de aquellas entidades cuyas propiedades causales nos son conocidas, sin que esta creencia se vea acompañada de una teoría en particular. Para Cartwright, no puede haber una teoría verdadera acerca de las entidades, y lo que hace que las cosas funcionen no son las leyes, sino las entidades teóricas que producen los efectos.

La Sección 7.4: “En defensa de las leyes fundamentales”, comienza defendiendo que todas las leyes, sin importar su nivel de generalidad, describen, predicen y explican: la descripción no va más allá de ligar ciertas cantidades físicas fundamentales y la explicación atiende a los distintos niveles de fundamentación teórica y empírica, y no constituye un porqué de las esencias del mundo. Analizo el papel de las leyes como fundamento de los modelos, y concluyo que su mayor o menor grado de abstracción se

VII. ANÁLISIS PRAGMÁTICOS DE LA REPRESENTACIÓN

refiere al alcance, y no al mayor o menor contacto con la realidad. Así, me opongo a que unos términos sean más abstractos o empíricos que otros, y definiendo la “esencia” de un fenómeno como una serie de ecuaciones que sintetizan su información física. Coincido con el enfoque general de los modelos como mediadores, que no hacen que los modelos formen parte de las teorías; sin embargo, creo que todas las suposiciones y aproximaciones que buscan simplificar las ecuaciones fundamentales se expresan también en forma de ecuaciones que constituyen premisas auxiliares dentro de un argumento lógico, por lo que considero que los modelos, cuando se obtienen de simplificaciones a partir de otros más fundamentales, son derivados deductivamente. Los modelos básicos son ideales que permiten una primera aproximación al fenómeno a los cuales se añaden correcciones que los hacen más precisos y complejos. Las leyes que contribuyen a su construcción no son verdaderas ni falsas, sino más o menos útiles, y no sólo resumen los datos: su labor de organización es sintética, y prueba de ello es su posible aplicación a nuevos campos y fenómenos más allá de su propuesta inicial de salvar determinadas apariencias. Por último, definiendo que, efectivamente, la “mejor explicación” es siempre “mejorable”, pero con ello sólo se quiere indicar que la verdad es una cuestión de precisión y que el isomorfismo es una meta imposible.

7.1. Representación e intervención

Para Ian Hacking (1996, p. 45), se puede ser realista respecto de las teorías científicas, es decir, creer que son verdaderas, y mantener una postura antirrealista para las entidades, pensando que son construcciones lógicas, como partes de un instrumento que se utiliza para predecir. Para Russell, por ejemplo, los términos son abreviaturas de una expresión compleja que sólo hace referencia a los fenómenos observados; las entidades deben sustituirse por construcciones lógicas, por enunciados acerca de los datos.

También se puede ser antirrealista respecto de las teorías, y realista para con las entidades, los objetos postulados por la teoría, pero que no podemos observar: partículas, campos, procesos, estructuras, estados, etc. Un planteamiento semejante admitiría que

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Los electrones existen, aunque ninguna descripción completa de los electrones tiene posibilidades de ser verdadera. Nuestras teorías están en revisión constante; para propósitos diferentes utilizamos modelos diferentes e incompatibles de los electrones que no se toman como literalmente verdaderos, pero, no obstante, hay electrones.

Un ejemplo de antirrealismo para las teorías podría ser el instrumentalismo de Dewey, para el cual las teorías son mecanismos de cálculo para la organización de descripciones y predicción de fenómenos; las teorías y las leyes, por sí solas, no son verdaderas; la teoría debe aceptarse y usarse.

Dentro del antirrealismo de entidades, podrían establecerse algunas diferencias. Para Smart, por ejemplo, las líneas de fuerza magnética, a diferencia de los electrones, son teóricas, y uno puede ser agnóstico respecto de su existencia real. Sin embargo, Faraday estaba convencido de que eran reales, y de que no se trataba simplemente de un modelo geométrico. Hacking (*op. cit.*, p. 54) señala que la negativa de Smart a aceptar como reales las líneas de fuerza, mientras considera reales los cristales, las moléculas, los átomos, y los electrones, se basa en una visión relativamente familiar de la ciencia:

Supongamos que el modelo del mundo físico debido a Leibniz, a Boscovic, al joven Kant, a Faraday, a los energetistas del siglo XIX, es de hecho más exitoso que el atomismo. Supongamos que la historia de la construcción con ladrillos ya no puede mantenerse en cierto momento. ¿Concluiría entonces Smart que las entidades fundamentales de la física son ficciones teóricas?

La distinción de Smart, entonces, no sirve. Faraday consideró reales las fuerzas aun cuando no hubiera limaduras de hierro; de hecho, obtuvo un efecto real: un motor eléctrico. Hacking distingue entre una herramienta para el cálculo y entre una relación de causa-efecto, como la que se da en un mecanismo experimental de protones y electrones. Su apuesta, en este sentido (*ibid.*, p. 48), es un realismo acerca de las entidades que pueden usarse en el trabajo experimental. La distinción entre la realidad y la ficción dependería más de la intervención efectiva que de la representación.

Varias son las razones con las que Hacking apoya sus argumentos. Una de ellas es la crítica de la distinción clásica entre sentido y referencia que viene de Frege. Según Putman, a la hora de hablar de clases naturales, cambiaría el sentido, pero no la referencia. Las distintas teorías que disponemos de los electrones (Rutherford, Millikan, Lorentz, Bohr, Schrödinger) hablarían de la misma cosa, la extensión estable del término,

VII. ANÁLISIS PRAGMÁTICOS DE LA REPRESENTACIÓN

aunque la inconmensurabilidad dijera que se tratan de cosas distintas. El referente fija la identidad de lo que hablamos: son aquí y allí electrones.

Sin embargo, para Hacking (*ibíd.*, p. 113), la teoría del significado de Putman funciona bien con los éxitos, como el electrón, pero no tanto con otros casos más complejos, como la acidez, o con cosas que no existen, como el calórico, donde los científicos franceses de la época se ponían de acuerdo en sus propiedades. La teoría de Putman, que se basa en cadenas causales a partir de un primer bautizo hasta nuestros días, no describe verdaderamente lo que ha sucedido. Habría que reflexionar sobre los contextos donde han sido bautizados los mesones, los protones, el calórico o los electrones¹⁷⁹. No sirven nombramientos abstractos. “Hay una historia verdadera que decir para cada uno de ellos”.

Por ejemplo, Yukawa había estado experimentando sobre el mecanismo que une al átomo. Postuló una partícula con masa entre el protón y el neutrón. En principio, se suponía que correspondía a los mesones, y así fue llamada mesón μ . Sin embargo, al final se transformó en un muón. Este caso no sólo pone de manifiesto (*ibíd.*, p. 113) que la teoría puede ser desconocida para los experimentadores, sino que los referentes se roban y que la teoría, en ocasiones (*ibíd.*, nota), escribe a su medida la historia experimental.

Además (*ibíd.*, pp. 129-130), no señalamos directamente un muón, sino sus trayectorias, por medio de indexicales como “esto” y “eso”. Hoy conocemos la masa del muón, 206.768 veces mayor que el electrón; pero para lograr ese número no sólo hay una práctica experimental, sino muchas: intervienen muchas mediciones, como el magnetón de Bohr, el momento magnético del electrón, etc. La referencia no es única, en el sentido clásico de Putman.

Hacking (*ibíd.*, p. 108) concluye que la teoría de significado no está bien adaptada a la filosofía de la ciencia, y debería de ocupar un lugar muy reducido en la filosofía (*ibíd.*, p. 103). Por el contrario (*ibíd.*, p. 131):

Asegurar la referencia no consiste principalmente en pronunciar verdades, sino en interactuar con el mundo.

Hacking (*ibíd.*, p. 172) también considera que el *Tractatus* de Wittgenstein está completamente equivocado, pues defiende una teoría copista del significado. Pero los

¹⁷⁹ *Ibíd.*, p. 114.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

científicos hacen representaciones mediante sistemas de modelaje, estructuras, teorías, aproximaciones, cálculos. Las representaciones de la Física son distintas maneras de hablar de objetos cotidianos: no hay una verdad última, sino una diversidad de representaciones. La realidad tiene que ver con la causalidad, con nuestras habilidades para interactuar con el mundo.

Tampoco la inferencia hacia la mejor explicación, como argumento favorable al realismo, puede ser un fundamento para creer en la verdad de los enunciados científicos o en la realidad de las entidades. Hacking (*ibíd.*, p. 73) está de acuerdo con van Fraassen y Cartwright en que una explicación no es suficiente: la creencia en la teoría de fotones se debe más a su poder predictivo que a su poder explicativo. “Tenemos sistemas alternativos de representación” (*ibíd.*, p. 167), y añade: “Las nuevas teorías son nuevas representaciones”. “Tan pronto como las representaciones empiezan a competir tenemos que pensar en lo que es real”. Y más adelante (*ibíd.*, p. 170), afirma: “Puede haber diversas maneras de representar los mismos hechos”.

Ni la verdad de la teoría, ni el propio concepto de racionalidad (*ibíd.*, p. 34), tal y como se han venido tratando por la Filosofía de la Ciencia, son importantes para aclarar la naturaleza del debate realismo-antirrealismo. En todo caso (*ibíd.*, p. 93),

Una proposición interesante es por lo general verdadera-falsa si hay un estilo de razonamiento que nos ayude a esclarecer su valor de verdad.

Pero este “estilo de razonamiento” no se puede encontrar en el nivel de la representación (*ibíd.*, p. 50):

Sospecho que no puede haber ningún argumento decisivo a favor o en contra del realismo en el nivel de la representación.

Y también (*ibíd.*, p. 169):

El realismo científico o el antirrealismo no se convierten en doctrinas verosímiles hasta que no hay criterios para juzgar si la constitución interna de las cosas es tal y como se representa.

VII. ANÁLISIS PRAGMÁTICOS DE LA REPRESENTACIÓN

Pero, ¿cuáles son esos “criterios”? No se sitúan, desde luego, en el plano de la representación. No se trata de “pensar” acerca del mundo, sino de cambiarlo, de intervenir en él. A fin de cuentas, es un problema de *actitud*.

El trabajo experimental proporciona la mejor evidencia para el realismo científico. Esto no se debe a que ponemos a prueba hipótesis acerca de entidades. Más bien, es porque las entidades que en principio no pueden ser “observadas” se manipulan regularmente para producir nuevos fenómenos y para investigar otros aspectos de la naturaleza. Son herramientas, instrumentos para hacer y no para pensar¹⁸⁰.

La ciencia experimental es relativamente independiente de la teoría. A pesar de que esta última se ha visto favorecida desde que existe la ciencia institucionalizada, es decir, desde Grecia hasta Boyle, Hacking (*ibíd.*, p. 177) preconiza una vuelta a Bacon, hasta los orígenes de la revolución del s. XVII, que declaró el experimento como el camino hacia el conocimiento. En este sentido, niega que el experimento esté completamente guiado por la teoría, como dice la versión fuerte del principio de la determinación teórica, según el cual tiene que haber una conjetura puesta a prueba, y duda incluso (*ibíd.*, p. 181) de la versión débil, donde se requieren sólo algunas ideas antes de realizar el experimento.

Ya Popper (1971, p. 107), pensaba que el experimentador, como mucho, responde a las preguntas que le propone el teórico. La teoría dominaría el trabajo experimental desde el principio hasta el final, y los resultados experimentales se interpretarían siempre a la luz de una teoría. Sin embargo, argumenta Hacking (1996, p. 184), la primera explicación de los anillos de Newton, ofrecida por Young, es de un siglo más tarde, de 1902. También Bartholin examinó la calcita de Islandia (con el consiguiente fenómeno de doble refracción) antes que cualquier teoría, lo mismo que Grimaldi y Hooke, cuando investigaron la difracción independientemente de las directrices teóricas de su época.

En todos estos casos, las observaciones precedieron a la teoría. Hay investigadores que no buscan confirmar teorías, y simplemente estudian el comportamiento de un fenómeno. No hay ninguna interpretación de los datos, ni buscan refutar; sólo explorar, a pesar de que muchas veces (*ibíd.*, p. 188) la historia de la ciencia, sobre todo si es una “reconstrucción racional”, falsea la verdad. Por ejemplo, en el caso de los premios No-

¹⁸⁰ *Ibíd.*, p. 291.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

bel Penzias y Wilson, los cuales encontraron la radiación uniforme de fondo antes de cualquier teoría sobre ella.

Igualmente (*ibíd.*, p. 191), Hacking muestra cómo “la historia de la termodinámica es una historia de invenciones prácticas que gradualmente llevaron a un análisis teórico”. El desarrollo de ciertas invenciones sigue su propio ritmo práctico, y la teoría se obtiene indirectamente, como en la máquina de vapor. Las mejoras técnicas de las máquinas condujeron al ciclo de Carnot, al principio de conservación de la energía, y a la ciencia de la Termodinámica. Aquí no hubo ni inducción ni contrastación de teorías.

Aunque se haya exagerado el papel de la observación (*ibíd.*, p. 196), ha habido observaciones muy importantes que no han incluido supuestos teóricos (*ibíd.*, p. 204). Así (*ibíd.*, p. 208):

La teoría puede abandonarse o sustituirse por una teoría totalmente diferente acerca de los positrones, pero deja intacto lo que para entonces se ha establecido como la clase de oraciones observacionales representadas por “esto es un positrón”.

Lo importante, en este punto, es que el significado no tiene por qué depender de la teoría. La Filosofía de la Ciencia, si fija su atención en la ciencia experimental, no tiene que sospechar del concepto mismo de observación (*ibíd.*, p. 214):

Puede parecer que todo enunciado acerca de lo que se ve con un microscopio está cargado de teoría: cargado con la teoría de la óptica o de otra radiación. No estoy de acuerdo. Se necesita teoría para hacer un microscopio. No se necesita teoría para usarlo [...] La práctica -me refiero en general a hacer, no a ver- desarrolla la habilidad para distinguir entre los artefactos visibles de la preparación o del instrumento, y la estructura real que se ve con el microscopio. Esta habilidad práctica genera convicción [...] Las observaciones y las manipulaciones muy pocas veces acarrearán una carga de teoría física, y lo poco de teoría que podamos encontrar es independiente de las células o de los cristales que se estén estudiando.¹⁸¹

Hacking señala (*ibíd.*, p. 221) que “los avances en la microscopía no han tenido nada que ver con la óptica”, y que (*ibíd.*, p. 229) “la vida experimental de la microscopía emplea medios no teóricos para distinguir entre artefactos y lo que es verdadero”. Una vez que mediante el microscopio observamos que hay puntos en la micrografía, sería ridículo suponer que dos sistemas físicos coincidan en proporcionar el mismo pa-

¹⁸¹ *Ibíd.*, pp. 220-221.

VII. ANÁLISIS PRAGMÁTICOS DE LA REPRESENTACIÓN

trón de puntos en las micrografías. Es decir, no son artefactos producidos por el microscopio, sino estructuras presentes en el espécimen que se observa (*ibíd.*, p. 232).

Al fin y al cabo, tal como sucede en la visión cotidiana de las cosas, las imágenes que el microscopio proporciona son una parte de nuestra confianza en la realidad. Ahora bien, la prueba definitiva está en la misma intervención sobre lo que aparentemente es observado (*ibíd.*, p. 234):

La microscopía biológica sin la bioquímica práctica es tan ciega como las intuiciones de Kant en la ausencia de conceptos.

Nuestro convencimiento sobre la existencia de estas estructuras que observamos se debe a la interferencia física directamente sobre ellas (*ibíd.*, p. 238). Este convencimiento no proviene de la teoría, sino de la bioquímica, que confirma la existencia de estructuras con propiedades químicas diferentes, sin necesidad de una teoría deductiva de la célula, “sino por el gran número de generalizaciones de bajo nivel que se superponen y nos permiten controlar y crear fenómenos en el microscopio”.

Esto sugiere una imagen de la ciencia diversificada, donde la mejor manera de controlar los aspectos de la realidad es (*ibíd.*, pp. 242, 248) “que las leyes sean inconsistentes unas con otras, cada una teniendo un contexto en la que se aplica, pero ninguna aplicable a todo”. Así, señala Hacking, se consiguen leyes más simples. El fin de la ciencia no sería la unidad, sino la completa diversificación (*ibíd.*, p. 249). Los modelos cambian de manera impredecible, y no hay una división entre modelos matemáticos y modelos físicos¹⁸².

En cualquier caso, el objetivo principal de estos modelos es que permitan la experimentación, la creación, producción y estabilización de fenómenos que no existen fuera de los artefactos de los experimentadores. En este sentido, experimentar es una tarea difícil, porque requiere el conocimiento de los instrumentos, de su técnica, para poder después producir los fenómenos (*ibíd.*, p. 249). Hacking señala (*ibíd.*) que hay pocos

¹⁸² Hacking se opone (p. 242) al “cliché engañoso” de Duhem según el cual los científicos franceses y alemanes utilizarían teorías abstractas de manera deductiva, mientras que los científicos ingleses harían hincapié en el uso de modelos físicos. Los modelos físicos de Maxwell implicaban estructuras altamente abstractas, mediante diferenciales, por ejemplo, en sustitución de corpúsculos; también los físicos alemanes y franceses utilizaban modelos físicos en sus construcciones. Por mi parte, he dado mis razones, en el Cap. II, para no separar entre modelos matemáticos y físicos.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

fenómenos en la naturaleza, al menos que existan por sí solos, fuera del ámbito de los planetas y las estrellas. La mayoría de los fenómenos, como el efecto Hall, son creados artificialmente, en el laboratorio, para convertirse después en piezas fundamentales de las teorías. De otra manera, suponer que hubiera sucesos resultantes de estos efectos, sería fruto de una orientación teórica. La naturaleza es por sí misma compleja, y la Física moderna investiga los fenómenos produciéndolos artificialmente en el laboratorio. Esta es una de las causas, según Hacking (*ibíd.*, p. 260), de que los experimentos y los fenómenos puedan repetirse. Mejor aún: se crean para repetirse, no para construir teorías, sino para educar experimentadores.

Una prueba de que la experimentación no está siempre dirigida por la teoría es el descubrimiento del electrón por parte de Millikan. El número que encontró no tenía mucho que ver con la teoría (*ibíd.*, p. 267), a pesar de que ayudó a fijar con más precisión otras constantes, las cuales, a su vez, tampoco influyeron en el desarrollo de la teoría. La determinación de constantes (*ibíd.*, p. 270) no parece ser la continuación de la teoría por otros medios.

¿Cuál es la consecuencia fundamental para el realismo sobre entidades? Pues bien, los electrones se convierten en entidades reales buscando interacciones con ellos, investigando propiedades causales que permitan construir aparatos que a su vez se utilicen en otros campos de la naturaleza. Entonces, cuando sistemáticamente se utilizan para manipular en otras partes de la naturaleza, se convierten en algo real.

Estamos completamente convencidos de la realidad de los electrones cuando regularmente construimos -y las más de las veces tenemos éxito en la construcción- nuevos tipos de aparatos que utilizan diversas propiedades causales bien comprendidas de los electrones que nos permiten interferir en otras partes más hipotéticas de la naturaleza.¹⁸³

No basta, pues, con la experimentación en sentido clásico, pues ésta no justifica, por sí sola, la creencia de que las entidades existan (*ibíd.*, p. 292). Sólo la manipulación permite hacer experimentos en otros campos, y concluir que los electrones son herramientas, no sólo para organización de nuestros pensamientos, sino como “maneras de crear fenómenos en algún dominio de la naturaleza”.

¹⁸³ *Ibíd.*, p. 294.

VII. ANÁLISIS PRAGMÁTICOS DE LA REPRESENTACIÓN

Enfocar un láser para desprender electrones se refiere al presente, no al uso futuro de una teoría verdadera. No hay por qué creer en las teorías. Las propiedades que se le atribuyen a un electrón se expresan de forma diferente en muchas teorías y modelos de los que se puede dudar. Los mismos experimentadores (*ibid.*, p. 293) pueden creer en teorías incompatibles. No hay un núcleo común teórico; se suceden las teorías, los modelos, las imágenes, los métodos y los formalismos. Sin embargo, si se puede rociar la bola de niobio con protones y electrones para disminuir la carga, entonces es que existen.

Entendemos los efectos, entendemos las causas, y las utilizamos para averiguar algo más¹⁸⁴.

Son estas manipulaciones “casi interminables” de lo teórico lo que nos permite diferenciar entre bosones neutrales y electrones. De los segundos, conocemos su existencia porque podemos manipularlos; los primeros, de momento, los usamos como postulados para la investigación, aunque es posible que nos convenzamos también de su realidad, si es que la ciencia permite algún día su manipulación.

En cualquier caso, no inferimos la realidad de estas entidades a partir de su éxito explicativo: primero no son los instrumentos, sino su diseño, que se basa en un pequeño número de verdades acerca de los electrones, el cual permite producir fenómenos. Hacking pone como ejemplo la construcción del cañón de electrones PEGGY II, la cual considera que no fue teórica, puesto que, entre otras cosas, no se conocían las propiedades de polarización de GaAs (*ibid.*, p. 299).

Las explicaciones no son garantía de verdad (*ibid.*, p. 300). Los fenómenos no se explican con electrones. Los electrones se usan. Hay una serie de propiedades causales de bajo nivel que se utilizan para investigar las corrientes neutrales débiles y los bosones neutrales. Mediante el uso de semejantes propiedades, las entidades teóricas pierden su carácter de hipótesis y se hacen reales: átomos, electrones... Entonces, hay que ser prácticos, y no teóricos. La polarización de electrones, su dispersión de distintas maneras, es un ejemplo de esta práctica científica que se realiza en los laboratorios. De todo ello concluye Hacking (p. 303):

La ingeniería, no la teorización, es la mejor prueba del realismo científico acerca de las entidades.

¹⁸⁴ *Ibid.*, p. 42.

“Ingeniería” implica “manipulación”, no sólo experimentación, puesto que puede que sólo haya mediciones, y nunca un uso real de la entidad. Si hay manipulación, lo normal es que el antirrealismo acerca de una entidad particular abra paso al realismo. Así sucedió con los fotones de Einstein, las moléculas del gas de Maxwell, o el número de Avogadro, que impulsó el programa atomista, y distinguió entre átomos y moléculas. De lo contrario (*ibid.*, p. 304), y después de mostrarse escéptico respecto a la existencia de agujeros negros, Hacking señala que las entidades teóricas que no terminan siendo manipuladas acaban siendo tremendos errores, como el flogisto, el éter, o el calórico.

7.2. Objeciones al realismo experimental

De entrada, quiero comentar que sigo sin comprender cómo a ciertos autores contemporáneos les disgustan tanto las grandes teorías científicas. No entiendo cómo pueden empuñarse en rechazar que los modelos de bajo nivel, como la ley de Balmer, de Boyle, o los esquemas teóricos de Sommerfeld, modelos que “salvan *determinadas* apariencias”, puedan derivarse a partir de leyes mucho más importantes y quedar, de este modo, *fundamentadas*, o explicadas teóricamente, como sugiere Rivadulla (2003). Tampoco comprendo por qué se insiste en considerar la ciencia como una serie de departamentos estancos aislados, o reinos ontológicos donde cada cual tendría sus propias leyes y no se permitiría la entrada a las demás. Pero, ¿qué problema hay en las leyes de Maxwell, en las ecuaciones de Faraday, o en las unificaciones de la Mecánica Cuántica? Porque Hacking nos dice, incluso, que lo mejor es que haya “leyes inconsistentes”¹⁸⁵ para cada uno de los contextos. ¿Tan dañino para la especie humana es que la ciencia intente *unificar* los modelos dispersos? ¿Tan fatal para la historia del hombre ha sido el *principio de no contradicción*? ¿Qué hay de malo en que alguien intente lograr un edificio coherente estructurado jerárquicamente, a partir de las leyes fundamentales?

Pero además, ¿cuáles son esos departamentos que están condenados a tener las mismas leyes de bajo nivel y los mismos modelos de datos para siempre? ¿Se podría avanzar en tales dominios? Porque avanzar en un fenómeno significa que las medidas se

¹⁸⁵ Hacking, *op. cit.*, pp 242, 248.

VII. ANÁLISIS PRAGMÁTICOS DE LA REPRESENTACIÓN

hagan más precisas¹⁸⁶. Pero, sin una mejora *técnica*, ¿cómo se van a desarrollar los instrumentos de medida? ¿Y quién conoce la técnica de una cosa sino aquel que conoce cómo funciona, aquel que conoce *su teoría*? Éste es, desde luego, el que sabe mejor usar el instrumento¹⁸⁷. El uso, la experiencia, no hace a los técnicos; los científicos, los ingenieros, estudian la teoría, y por eso saben más que los demás, y saben mejor utilizar las cosas y para qué funcionan, aunque Hacking piense lo contrario.

Porque teoría y técnica son una misma cosa, y, desde luego, ni son entes aislados ni están contrapuestas¹⁸⁸. El mejor físico teórico es el que mejor sabe qué puede experimentarse y qué no se puede experimentar. Y realiza él mismo los experimentos, como Planck o Newton, o los deja indicados, como Einstein y Galileo. Pero todos saben lo mismo sobre Física, esto es, más que los demás, y ello en virtud de su conocimiento teórico, que en ningún momento disocian del conocimiento práctico. La Física trata de la experiencia, y sus teorías se refieren a la experiencia, y aunque utilicen herramientas matemáticas, hacen Física, y no se refieren a “inobservables”, ni siquiera parcialmente,

¹⁸⁶ El progreso de la ciencia, en general, es una cuestión de *precisión*, de medida.

¹⁸⁷ Cf. Aristóteles, *Metafísica*, Libro I, Capítulo I, 981a25-30: “Pero no es menos cierto que pensamos que el saber y el conocer se dan más bien en el arte que en la experiencia y tenemos por más sabios a los hombres de arte que a los de experiencia, como que la sabiduría acompaña a cada uno en mayor grado según el nivel de su saber. Y esto porque los unos saben la causa y los otros no. Efectivamente, los hombres de experiencia saben el hecho, pero no el porqué, mientras que los otros conocen el porqué, la causa.”

¹⁸⁸ Si la verdad es una cuestión de precisión, y no de adecuación, un instrumento se construye mediante teorías cada vez más precisas que podrán aumentar, entre otras cosas, la sensibilidad de los sensores. Para construir un circuito integrado, por ejemplo, se necesita estudiar la tecnología del silicio, sus propiedades eléctricas y mecánicas, su oxidación, difusión e implantación de iones. *Los problemas técnicos son problemas teóricos*. Su resolución exige nuevos modelos que tengan en cuenta nuevas situaciones. Son las mejoras teóricas, aquellas que solucionan problemas reales, las que permiten construir dispositivos cada vez más eficaces, en el sentido de que son capaces de discriminar más las señales del exterior y proporcionar nueva información sobre la realidad.

La tecnología está cargada de teoría en el sentido de que tiene una mayor precisión incorporada. Es decir, un instrumento de observación que incorpore la última tecnología lo que hace es proporcionar una mayor resolución, un mayor detalle, porque su construcción se basa en las teorías más avanzadas, es decir, en las más precisas. Un instrumento se queda obsoleto porque *las teorías tienen un límite*, a partir del cual son necesarias otras teorías que permitan ver *más* que las anteriores. Las teorías no son verdaderas o falsas, sino más o menos precisas, según el grado de ajuste que muestren con las medidas que una época dispone.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

como piensa van Fraassen, ni a mundos ontológicos extraños, como creía Duhem. En ninguna otra ciencia están más unidos la teoría, el modelo y el experimento. La naturaleza de su método, desde Aristóteles, refleja esta peculiaridad.

Porque cuando las teorías se pronuncian acerca del electrón, no se quedan esperando que alguien “manipule efectivamente” el objeto y construya con él nuevos aparatos. Lo real, en Física, es lo detectable, lo que puede registrarse, y, posteriormente, sistematizarse. Un electrón es un sistema, una representación, que sintetiza la información que se conoce de ciertas propiedades que pueden medirse. Lo real, estrictamente, son esas dimensiones, que pueden representarse de distintas maneras. La realidad de una “cosa” se conoce de manera *inmediata*, y no *a posteriori*. La Física ya sabe que hay “algo real”, por ejemplo, cuando en un sistema de partículas no se cumple el principio de conservación de la cantidad de movimiento o de la energía. Entonces se pregunta si no habrá otra partícula que se haya quedado con parte de la cantidad de movimiento que no aparece en la medida. Esta tercera partícula puede que no se observe, en principio, porque carezca de carga eléctrica, o por cualquier otro motivo. Pero entonces a la hipotética partícula se la asigna una cantidad de movimiento y una energía, *para que las leyes de conservación se cumplan*¹⁸⁹. Y entonces se descubren otras partículas, y se investigan sus propiedades, pero siempre desde principios teóricos, con el mayor rigor posible; y cuando al científico no le queda más remedio, porque existe el problema de los *n* cuerpos, por ejemplo, entonces simplifica porque no puede calcular. Pero aun así, las leyes que se refieren a la energía cinética del sistema, a su momento angular, y las que hacen referencia al centro de masa del sistema, por ejemplo, *siguen siendo válidas*.

Lo importante es que la Física busca utilizando sus teorías; investiga, experimenta y “manipula” con las propias leyes. Y, además, con las más fundamentales, con las que considera más verdaderas de todas. Sólo cuando no puede hacerlo, entonces elabora un modelo empírico de datos (cosa nada fácil, por cierto), y *aguarda* a que alguien le ex-

¹⁸⁹ Véase Alonso & Finn (1986, p. 267): “Este procedimiento hasta la fecha ha dado siempre resultados consistentes tanto con la teoría como con el experimento”. También en p. 160: “No se conocen excepciones a este principio general de conservación del momentum [cantidad de movimiento]. Por el contrario, cuando parece que hay violación de este principio en un experimento, el físico inmediatamente busca alguna partícula desconocida, o que no ha notado y la cual puede ser la causa de la aparente falta de conservación del momentum. Es esta búsqueda la que ha dado lugar a que los físicos identifiquen el neutrón, el neutrino, el fotón, y muchas otra partículas elementales.” *¿Por qué seguir sin reconocer el papel de las leyes fundamentales en la investigación?*

VII. ANÁLISIS PRAGMÁTICOS DE LA REPRESENTACIÓN

plique por qué sucede eso. Pero incluso el modelo empírico se acomoda a todos los principios teóricos que puede, para no perder exactitud física, poder predictivo, porque, como ya he dicho en alguna otra ocasión, una ley fundamental, no por ser más abstracta, se va a referir menos a la realidad¹⁹⁰.

La teoría guía *siempre* a la experimentación, entre otras cosas, porque la ciencia es una empresa lingüística, que utiliza ecuaciones, y no tiene otra manera de dirigirse al mundo. Los modelos no son “entidades extralingüísticas”, cualquiera que sea el significado de esta expresión; no son realizaciones en el mundo, no son realidades en sí mismas; son representaciones. Y la única manera que tenemos de representar algo es hacerlo por medio del lenguaje. Los argumentos, las explicaciones, las predicciones y las descripciones de la realidad se realizan teóricamente, en un plano lingüístico, y esto significa que la ciencia procede de modo lógico, ordenado, plasmando en el lenguaje sus intuiciones, simplificaciones, leyes y suposiciones, en forma de premisas y conclusiones. No hay más remedio: hay que pasar por el filtro lógico del lenguaje.

Pero, por supuesto, y como bien indica Hacking, eso no significa que la observación esté cargada teóricamente, si esto significa que la teoría pueda predisponer los resultados experimentales. Es cierto que hay hechos experimentales relativamente independientes de las teorías utilizadas en ese momento. Puede haber determinados modelos de datos, modelos meramente empíricos, como los estudiados en el capítulo anterior, que están relativamente aislados de la teoría, y para los que se busca una explicación. Los anillos de Newton son un buen ejemplo, pero la historia de la Astronomía también sirve para indicar cómo el desarrollo de estos modelos de bajo nivel, no directamente derivados de los principios fundamentales teóricos considerados verdaderos, **T**, son hasta cierto punto independientes de consideraciones teóricas fundamentales. Pero sigue habiendo teoría en estos modelos, aunque varíe su nivel de generalidad. Y, en todo caso, lo que se pretende es llegar a derivarlos desde principios fundamentales, para que así queden explicados y fundamentados.

Igual que en Matemáticas, donde, como señala Burgos (1984, XIII):

Sin acudir a la inventiva, difícilmente puede resolverse una cuestión novedosa, salvo si se conoce *a priori* su desenlace. Aventurando hipótesis, y de la mano de la experiencia, se han descubierto muchos

¹⁹⁰ Desconozco de dónde se ha heredado el prejuicio de que las leyes fundamentales “no dicen nada”.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

teoremas, pero ninguno de ellos ha llegado a formar parte del conocimiento matemático hasta no haber sido demostrado de forma rigurosa.

También en Física *un modelo empírico de datos no forma parte del conocimiento estricto de la Física hasta que no sea demostrado, también de forma rigurosa, es decir, explicado teóricamente, a partir de principios fundamentales*. Esto no significa despreciar la labor del experimentador; todo lo más, indica que la ciencia se ocupa de resolver contradicciones y hacer de su cuerpo un todo ordenado deductivamente a partir de primeros principios. No hay nada malo en ello, es una cuestión de eficiencia. El caso es similar a dos o más programas informáticos que se aplican en dominios distintos. Como afortunadamente, al menos hasta ahora, en Física no existen las patentes, ¿qué hay de malo en investigar un nuevo *software* capaz de *sintetizar* los programas anteriores? Con ello no se perdería diversificación, pues al final obtendríamos la misma eficiencia empírica en los casos particulares. Pero obtendríamos una nueva síntesis, una unificación en principios superiores. Los viejos programas quedarían integrados como una especie de *subrutinas* dentro de una *rutina* más general. Porque, en ciencia, la síntesis no sólo es de datos, sino también de leyes, como la propia Historia de la Ciencia pone de manifiesto.

Las contradicciones esperan ser resueltas; no se las deja reposar en su dominio de aplicación restringido. En el capítulo anterior, veíamos cómo un físico teórico se las ingeniaba para derivar un primer modelo de datos a partir de leyes fundamentales. Habíamos supuesto que lo había conseguido. Pero las medidas se hicieron más precisas; el modelo de datos cambió, y nos habíamos olvidado de la respuesta del físico teórico. Seguramente, habría intentado nuevamente derivar el modelo a partir de teorías más fundamentales. Si no lo consiguiera, podría arriesgarse a considerar como verdadera la serie de principios de bajo nivel, **H**, que han logrado construir el modelo de datos, y generalizarlos para otros modelos de más alto nivel, a sabiendas de que muchos de ellos son contradictorios con el cuerpo dominante de **T**.

Sin entrar en si éste sería el principio de una “revolución científica”, lo que quiero destacar es que, *incluso en el caso de admitir la contradicción, se trabajaría para solucionarla*, aunque fuera reconstruyendo todo el edificio científico a partir de nuevos pilares. El lema sería, como en el *Gatopardo*, “cambiar todo para que todo siga igual”; es decir, cambiar los principios fundamentales para que el conjunto de hechos fundamentales conocidos, expresados en **D**, en lo que yo he llamado el conjunto de enunciados de

VII. ANÁLISIS PRAGMÁTICOS DE LA REPRESENTACIÓN

observación considerados verdaderos, pudiera seguir siendo derivado a partir de leyes fundamentales, *más* los nuevos fenómenos que dieron lugar a la contradicción con el viejo conjunto de enunciados teóricos aceptados, **T'**, y que ahora se han convertido en “aproximaciones útiles” para ciertos casos. El objetivo de toda la revolución científica, una vez consumada, habría sido, curiosamente, mantener el todo coherente bajo el principio de no contradicción¹⁹¹.

Las teorías están en revisión constante, pero eso es algo positivo, porque significa que los resultados experimentales continuamente afectan a los modelos. Pero las correcciones de las teorías no se establecen en todas las leyes a la vez, sino en las menos fundamentales, en las más “empíricas”, que son, justamente, las que antes se exponen a la refutación.

Hacking dice que hay “muchos sistemas alternativos” de representación. Pero no tienen las mismas características. Hay sistemas alternativos equivalentes desde el punto de vista físico. En esta tesis se han dado ejemplos de muchas representaciones distintas que en esencia equivalen a una misma cosa. Una síntesis puede tener distintas representaciones, si todas ellas resultan equivalentes. Pero es cierto que existen sistemas alternativos que no son equivalentes, y que se construyen sobre principios físicos radicalmente incompatibles. En este caso, se pueden comparar, puede efectuarse el *balance predictivo*¹⁹², porque *la incompatibilidad no es equivalente a la “incommensurabilidad”*. Incluso si se obtienen los mismos resultados empíricos para dos sistemas alternativos se puede seguir escogiendo, y la elección sigue siendo igual de racional. La llamada “subdeterminación empírica” no tiene en cuenta que la justificación del modelo es doble, y que tanto monta su justificación teórica como su adecuación empírica. Y ello en virtud precisamente del mayor alcance de los modelos que están justificados teóricamente, frente a aquellos que se limitan a “salvar las apariencias”.

Porque dos representaciones incompatibles válidas para un determinado dominio, pueden no serlo cuando el dominio se ensancha y entran nuevos fenómenos en juego. El salto de un dominio particular a otro más general no supone ningún salto cualitativo en la naturaleza, ya que las propiedades físicas implicadas, las dimensiones, son siempre las mismas, aunque se relacionen de manera diferente. Las ecuaciones de Lorentz pue-

¹⁹¹ Se trata, en palabras de Kuhn, de establecer un nuevo “paradigma”, y no muchos, como pensaba Feyerabend.

¹⁹² Cf. Rivadulla (2004, 2003).

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

den ser empíricamente equivalentes a las de Einstein, tratándose del experimento de Michelson-Morley. Pero, ¿qué ocurre si nos fijamos en otros campos de la naturaleza donde están implicadas las mismas dimensiones físicas que en el experimento, es decir, donde interviene la velocidad de la luz, el tiempo y el espacio respecto de distintos sistemas de referencia? En estos casos, la ecuación de Lorentz no es capaz de explicar lo que la Teoría de la Relatividad explica perfectamente. La equivalencia en los resultados experimentales sólo se refiere a un dominio muy particular; pero, ¿por qué detenerse en él y no mirar qué ocurre en otros dominios con las mismas propiedades físicas? En estos dominios más amplios, la subdeterminación empírica se revela como una *fábula*, válida sólo en condiciones muy particulares, en condiciones *ceteris paribus* muchísimo más fuertes que las que se asocian normalmente a una ley científica fundamental¹⁹³.

Los sistemas alternativos de representación, si parten de principios incompatibles a un nivel fundamental, en los principios que sustentan los modelos, se dan sobre todo en áreas relativamente novedosas donde la Física está investigando las propiedades de estos fenómenos. El ejemplo de la Física Nuclear es elocuente. Pero, dando un pequeño paso atrás, y fijándonos en los fenómenos de la Física Atómica, ¿dónde están aquí las teorías incompatibles, y los sistemas incompatibles de representación? ¿O es que la Mecánica Cuántica no es capaz de explicar las propiedades de la Tabla Periódica? Pero, en la gran mayoría de los fenómenos termodinámicos, ¿no están claras las leyes de conducción del calor? En el electromagnetismo, ¿también se trabaja con teorías fundamentales incompatibles? No parece que ésta sea una conclusión apropiada cuando nos detenemos en la lectura de los propios textos científicos, bien sean manuales, bien sean artículos científicos. Tampoco parece conveniente generalizar todos los resultados de un área tan novedosa como la Física elemental de partículas para el resto de las parcelas científicas, donde hay teorías muy firmes y a las que resulta sumamente difícil llegar para “refutarlas”. La investigación en áreas novedosas es un aspecto más, esencial, pero que no debe dejar pasar por alto el hecho de que la ciencia, para la inmensa mayoría de los fenómenos conocidos, tiene una explicación, y esa explicación, como no puede ser de otra manera, es teórica.

¹⁹³ Es curioso que muchos autores que, por una parte, insisten en el carácter restringido de las leyes científicas mediante cláusulas *ceteris paribus*, por otra parte, defiendan la subdeterminación sin tener en cuenta las terribles implicaciones *ceteris paribus* a la hora de comparar modelos incompatibles en un *solo* dominio.

VII. ANÁLISIS PRAGMÁTICOS DE LA REPRESENTACIÓN

Hacking tiene razón en insistir en que hay una serie de experimentos cuyos resultados no están guiados por ninguna teoría fundamental. Pero eso es parte del juego, parte de la racionalidad de la ciencia. Los orígenes de la Termodinámica posiblemente sean experimentales; o, si se quiere, son razones prácticas, de ingeniería, las que mejoran las sucesivas máquinas de vapor, o las bombas de vacío. Pero llega un punto en que se trata de encontrar qué leyes fundamentales intervienen allí, y eso es tarea de la Física. Los experimentos se van investigando, se van fundamentando; se los somete a un análisis que permita deducir leyes fundamentales¹⁹⁴. También la historia de la Mecánica Cuántica comienza por tanteos, a partir de modelos más simples, a partir de leyes empíricas que salvan las apariencias de la radiación del cuerpo negro. Pero esas hipótesis, en principio de bajo nivel, van subiendo en abstracción hasta llegar a dominar el cuerpo entero teórico, hasta que la teoría se completa y todos los modelos de bajo nivel quedan explicados a partir de sus leyes. Las explicaciones, en estos casos, vienen después: *¿y qué?* Eso no dice nada en contra de la teoría; si se supieran las causas de todo, no habría teorías, ni ciencia, pero tampoco experimentos. Porque no sólo los experimentos, sino las leyes de cierto nivel de abstracción, requieren una explicación¹⁹⁵: el ciclo de Carnot, por ejemplo. E incluso las teorías más abstractas, como la Teoría de la Relatividad Restringida, es explicada en el marco de otra teoría más comprensiva. En estos casos, la explicación llega mucho después, pero únicamente porque es parte del orden lógico de las cosas.

Por otra parte, ¿cuáles son las condiciones necesarias y suficientes para que exista una “intervención efectiva”, una “manipulación”? Hacking dice que “investigando propiedades causales que permitan construir aparatos”. ¿Y cómo se investigan las propiedades causales? Hay un “gran número de generalizaciones de bajo nivel que se superponen y permiten crear fenómenos”¹⁹⁶. Pero esto, o quiere decir inductivamente, o quiere decir otra cosa que no puedo comprender. Porque las “generalizaciones de bajo nivel” son *otra* fábula, igual que la “subdeterminación empírica”. Ante un conjunto de datos, ante una serie de medidas, delante de una tabla empírica, no hay generalización que valga, ni resumen de datos. Hay *talento matemático* para lograr un modelo de datos que

¹⁹⁴ No obstante, cuando Leibniz enuncia el principio de conservación de la energía, no tiene delante ninguna máquina de vapor.

¹⁹⁵ Cf. Rivadulla, 2004, pp. 70-87.

¹⁹⁶ Hacking, *op. cit.* p. 238.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

genere las medidas a partir de una serie de principios físicos. No hay ningún método; hay que “ver” la fórmula que sintetiza los datos; hay que proceder por prueba y error, hasta que se tenga.

Además, las propiedades causales no se obtienen milagrosamente bajando de nivel; *no hace falta añadirle ningún causalismo a las teorías físicas: ya son, de por sí, causales*. Tanto arriba como abajo, dentro del árbol de la ciencia, *ya* hay causalismo, *ya* se trabaja con causas, por mucha mala prensa que tenga esta palabra¹⁹⁷. Porque las causas, en Física, no hacen referencia a causas extrañas, metafísicas, o de otra índole parecida. Por ejemplo, dice la primera ley de Laplace (o ley de Biot y Savart): “Todo elemento de corriente de un conductor filiforme crea un campo magnético en el espacio”. Pero en realidad la corriente no “crea” ningún campo. “Crear” significa aquí “causar”, y “causar” no significa que una intensidad de corriente cree de la nada un campo magnético, sino que una cosa no se da sin la otra. No puede haber una corriente sin inducción electromagnética. El elemento de corriente y el campo magnético *coexisten* necesariamente: ese es el significado de la ley. Y el valor de esa coexistencia viene expresada en forma matemática, a partir de una ecuación que liga ambas dimensiones:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{\vec{r}_0 \times d\vec{l}}{r^2},$$

donde dB es la inducción magnética, μ_0 es la permeabilidad absoluta del vacío, I es la corriente que circula por el conductor y r_0 es el vector unitario. Para r constante, si aumentamos la intensidad de corriente aumentará la inducción magnética, y si aumentamos la inducción aumentará la corriente. Pero si aumenta la distancia r el observador situado en un punto P siente y puede medir un campo magnético menor para una intensidad de corriente constante. Qué sea una causa y qué sea un efecto depende de qué se considere que ha variado antes, aunque este “antes” no exista de manera absoluta, sino que depende de qué se quiera medir y de qué se quiera investigar. *Los efectos y las causas, en una ecuación, no se distinguen entre sí*. Pero, por supuesto, *ya están incluidos*.

De igual forma, en todas las leyes de la Física está supuesto el causalismo, que no significa ni más ni menos que esto: *dado un incremento de magnitud detectable en tal*

¹⁹⁷ Lo mismo le ocurre a la palabra “intensión”, frente a “extensión”. ¡Como si una teoría pudiera definirse “extensionalmente”, a partir de la enumeración de los elementos de un conjunto!

VII. ANÁLISIS PRAGMÁTICOS DE LA REPRESENTACIÓN

*dimensión, ese incremento ha sido causado por el incremento en la magnitud de otra dimensión. ¿Qué causas metafísicas hay implicadas aquí? Ninguna. Porque una eigenfunción trata de las mismas cosas que la ley de Boyle, y no se diferencian cualitativamente en nada. Es decir, que hay tanto causalismo en la una como en la otra; y hay tanto causalismo en un modelo básico ptolemaico como en las ecuaciones del campo gravitatorio de Einstein. No hay unas más “matemáticas” que otras: todas se refieren a la realidad, porque vinculan magnitudes y dimensiones que se refieren, *directamente*, a la experiencia.*

Donde sí que parece existir un causalismo más fuerte que el que está implicado en cualquier ley científica, es en la tesis de Hacking de que ciertos “fenómenos sólo existen en los “artefactos” de los experimentadores”¹⁹⁸, idea que se repite cuando afirma que “hay pocos fenómenos en la naturaleza, al margen de los planetas y de las estrellas”, o cuando repite que “el efecto Hall fue creado en el laboratorio”. Aquí parece que ciertos aparatos, artefactos o laboratorios son capaces de crear fenómenos. Y a juzgar por sus palabras, resulta una creación *ex nihilo*. Dado que, supuestamente, las teorías apenas intervendrían para la construcción de estos poderosos aparatos, yo me pregunto de qué sustancia mágica están hechos estos aparatos. Porque dejando de lado el hecho de que los planos de un acelerador de partículas, de un cañón de electrones o de una central nuclear se basan en principios *absolutamente* teóricos, ¿qué tiene un laboratorio que no tenga el resto de la naturaleza, a la hora de “producir” y “estabilizar” fenómenos? Porque un laboratorio, en principio, no parece ser más que un lugar donde se experimenta; es decir, donde pueden aislarse los sistemas, donde no hay “ruido” (en el sentido de la Teoría de Señales), y, presumiblemente, donde existe una serie de aparatos con una resolución mucho mayor de la que resulta accesible para el resto de la población. Pero, como espacio físico, no parece que lo que allí se produzca no pueda producirse en cualquier otro sitio¹⁹⁹. Que en un laboratorio se den las condiciones óptimas para conducir y preguntar a la naturaleza una serie de relaciones entre varios de sus componentes, no

¹⁹⁸ Hacking, *op. cit.*, p. 249.

¹⁹⁹ Cf., por ejemplo, Eisberg & Resnik (2000, p. 64): “El proceso de *bremstrahlung* [espectro continuo de radiación X] ocurre no solamente en tubos de rayos X, sino en cualquier parte en que los electrones choquen con la materia, como en los rayos cósmicos, en los cinturones de radiación de van Allen que circundan la tierra y en el frenamiento de electrones que emergen de los aceleradores o núcleos radiactivos.”

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

significa que estos hechos se produzcan sólo allí; sino, a lo sumo, que allí se dan las mejores condiciones para experimentarlo. En cualquier caso, sigo pensando que los fenómenos se descubren y luego se reconstruyen sistemáticamente en una representación, en un modelo. Los fenómenos no se crean, y ya estaban ahí mucho antes de que llegáramos nosotros y los viéramos.

7.3. Descripciones fenomenológicas

Una vez que he mostrado las limitaciones que a mi juicio ofrece el “realismo experimental” de Hacking, paso a estudiar el segundo de los análisis pragmáticos que considero relevante para esta tesis doctoral. En primer lugar (apartado “A”), resumiré las tesis de Nancy Cartwright acerca de las diferencias entre leyes fundamentales y leyes fenomenológicas, así como sus dudas respecto a la posible unificación de la ciencia bajo un único sistema. En segundo lugar (apartado “B”) expondré el papel de los modelos dentro de su epistemología científica. En tercer lugar (apartado “C”) resumiré los motivos fundamentales por los que rechaza la “inferencia a la mejor explicación” (IME) y su defensa del causalismo a favor de la existencia de las entidades teóricas. Por supuesto, los tres apartados se vinculan y apoyan mutuamente. El objetivo, como he señalado en la Introducción de este capítulo, es resaltar la importancia de las leyes fundamentales a la hora de experimentar, investigar y sistematizar el contenido empírico disponible.

A) Nancy Cartwright (1991, pp. 1-3) retoma, primeramente, la distinción clásica entre leyes fenomenológicas, que describen las apariencias y tratan de cosas que se observan directamente, y leyes teóricas, que, por el contrario, describen lo que está detrás de las apariencias, y hablan sobre lo observable indirectamente, a través de inferencias. Para ella, la distinción no descansa tanto entre lo que es observable e inobservable, sino entre lo fenomenológico, caracterizado como lo que describe, y lo fundamental, como aquello que explica. Su antirrealismo acepta la verdad de las leyes fenomenológicas mientras que rechaza que las leyes fundamentales se correspondan con los hechos.

VII. ANÁLISIS PRAGMÁTICOS DE LA REPRESENTACIÓN

Realists are inclined to believe that if theoretical laws are false and inaccurate, then phenomenological laws are more so. I urge just the reverse. When it comes to the test, fundamental laws are far worse off than the phenomenological laws they are supposed to explain.²⁰⁰

La falsedad de las leyes fundamentales es consecuencia de su voluntad explicativa. Esto hace que las leyes fundamentales no sean verdaderas, sino más bien falsas. Las ecuaciones abstractas (*op. cit.*, p. 9) no describen las circunstancias particulares, sino que explican mediante condiciones *ceteris paribus*, mediante aproximaciones.

The application of laws to reality by a series of *ad verum* approximations argues for their falsehood, not their truth²⁰¹.

Pero estas leyes *ceteris paribus*, que restringen la aplicación de la ley a situaciones muy específicas y controladas, no son verdaderas. La realidad es mucho más compleja (*ibid.*, p. 51), y no hay leyes generales que describan todas las situaciones. En todo caso (*ibid.*, p. 18), las leyes fundamentales se cumplen para los objetos del modelo, y no gobiernan los objetos de la realidad.

Por ejemplo (*ibid.*, p. 56), si en un sistema dos cuerpos se atraen gravitacionalmente y están cargados eléctricamente, dos leyes funcionan: la ley de gravitación universal, y la ley de Coulomb. Ambas se complementan, y ninguna es verdadera por sí sola, ni siquiera aproximadamente. Con la introducción de las condiciones *ceteris paribus*, la ley de gravitación es “irrelevante” (*ibid.*, p. 58) para los casos más complejos, donde existan fuerzas eléctricas o nucleares. Cada ecuación es una ley *ceteris paribus* (*ibid.*, p. 64), cuyo objetivo es explicar y predecir, no describir. Podemos añadir vectorialmente las fuerzas, pero eso sólo lo hacemos para calcular; la naturaleza, por sí misma, no añade fuerzas (*ibid.*, p. 59).

Además (*ibid.*, p. 70), no siempre hay leyes fundamentales disponibles. Puede haber razones para creer que existen, pero otras veces no. A veces hay, pero no explican. Y lo más importante, incluso si hay buenas explicaciones, podemos fallar a la hora de describir los componentes reales que actúan en un fenómeno, perdiendo comprensión del modo como las cosas se realizan.

²⁰⁰ *Ibid.*, p. 3.

²⁰¹ *Ibid.*, p. 15.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Por el contrario (*ibíd.*, p. 66), la naturaleza queda mejor descrita con una variedad de leyes fenomenológicas, que se aplican en situaciones específicas, que con un todo ordenado que procede desde los primeros principios.

The great explanatory and predictive powers of our theories lies in their fundamental laws. Nevertheless the content of our scientific knowledge is expressed in the phenomenological laws²⁰².

Cuando se trata de describir el mundo (*ibíd.*, pp. 127-128), las leyes fenomenológicas son las que se utilizan. Cartwright se refiere a la diferencia entre las “simples” ecuaciones matemáticas y las descripciones confusas, expresadas en fórmulas o palabras, que describen lo que sucede en los sistemas reales.

I think we can allow that all sorts of statements represent facts of nature, including the generalizations one learns in biology or engineering. It is just the fundamental explanatory laws that do not truly represent²⁰³.

Las leyes fenomenológicas son leyes de bajo nivel que describen el contenido empírico de los objetos reales. A diferencia de las leyes fundamentales, que no se corresponden con los hechos por su poder explicativo, las leyes fenomenológicas no explican nomológicamente, mediante deducciones, sino que se atienen a la compleja realidad de la naturaleza y describen, hasta donde pueden, relaciones entre objetos reales.

Hay un inmenso número de leyes fenomenológicas aceptadas (*ibíd.*, p. 3). Cartwright afirma (*ibíd.*, p. 104) que, a diferencia de lo que suele pensarse, no hay una derivación estricta desde las leyes fundamentales hasta estas leyes fenomenológicas. Ni siquiera un completo conocimiento de las circunstancias provee las premisas necesarias para deducir las leyes fenomenológicas (*ibíd.*, p. 106). La elección no está dictada por los hechos, y diferentes aproximaciones pueden dar resultados incompatibles. Lo más importante (*ibíd.*, p. 118) es que

If a pure exponential law is to be derived, we had better take our approximations as improvements on the initial Schroedinger equation, and not departures from the truth.

²⁰² *Op. cit.* p. 100.

²⁰³ *Ibíd.*, p. 56.

VII. ANÁLISIS PRAGMÁTICOS DE LA REPRESENTACIÓN

Las descripciones fenomenológicas no están atadas necesariamente a las ecuaciones. En Cartwright (2001, p. 47), se afirma que la teoría sólo proporciona relaciones abstractas entre conceptos, relaciones que no representan lo que ocurre. La Electrodinámica Cuántica, la Mecánica Cuántica, la Mecánica Clásica, o el Electromagnetismo Clásico, usan conceptos abstractos que necesitan concretar su significado empírico. Para este fin, dentro de la teoría, existen una serie de principios-puente (*bridge principles*), lo que el Círculo de Viena llamaba modelos interpretativos, que conectan a la realidad términos abstractos como el Hamiltoniano, la fuerza, y los vectores electromagnéticos de campo. Para Cartwright, la masa, la carga, la aceleración, la distancia, y el estado cuántico no son términos abstractos.

Force -and various other abstract terms from physics as well- is not a concrete term in the way that a colour predicate is²⁰⁴.

Así que estos términos necesitan una descripción en términos más concretos. Más adelante (*ibíd.*, pp. 45-46), añade:

In the case of force, the more concrete descriptions are ones that use the traditional mechanical concepts, such as position, extension, motion, and mass. Force then, on my account, is abstract relative to these concepts from mechanics; and being abstract, it can only exist in particular mechanical models.

A pesar de que los *bridge principles* nos recuerdan a las reglas de correspondencia del positivismo lógico, hay una diferencia muy importante entre ellos (*ibíd.*, p. 190):

Abstract concepts are in no way second-class citizens relative to the more concrete concepts which they depend on; on the contrary, these are just the concepts we need in physics for systematic explanation and prediction. To label a description as “abstract” is to say something about how it attaches to the world, not about its power to explain what happens there.

El éxito de la Mecánica Cuántica, por ejemplo, se debe a que los principios-puente interpretan la teoría en determinadas situaciones (*ibíd.*, p. 191). El Hamiltoniano cuántico es abstracto, y necesita aquellos principios-puente (que forman parte de la teoría) que proveen los correspondientes Hamiltonianos para todos los modelos interpretativos. Los

²⁰⁴ *Ibid.*, p. 45.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

principios-puente no son reglas de correspondencia que indiquen la medida de una cantidad, sino que tiene que ver con la distinción dentro de los términos teóricos entre términos abstractos y aquellos que no lo son (*ibid.*, p. 195). Estos principios (*ibid.*, p. 196) nos dicen los límites de aplicabilidad de la teoría. La teoría se aplica en aquellas situaciones que pueden ser representadas por los modelos interpretativos: en el caso de la Teoría Cuántica, potenciales centrales, interacciones de Coulomb, osciladores armónicos, etc.

The Hamiltonians function as abstract concepts introduced only in conjunction with an appropriate choice of a concrete description from among our set stock of interpretative models²⁰⁵.

La distinción entre términos abstractos y concretos limita el alcance de aplicación de los términos teóricos. En una ecuación como “ $F = ma$ ” se conocen las situaciones típicas donde las funciones de la fuerza son exhibidas (*ibid.*, p. 43). Es decir, que las leyes son obtenidas en situaciones específicas, si nada interfiere en el sistema. En este sentido, Cartwright señala (*ibid.*, pp. 47-48) que la mayoría de las veces las leyes de la Física son verdaderas solamente allí donde han sido creadas. Las leyes serían verdaderas en el modelo, pero la realidad no encaja perfectamente en el modelo: la pregunta por la verdad de la segunda ley de Newton es relativa a su modelo, y no tiene por qué gobernar la materia real.

Las leyes se cumplen con relación a las repetidas operaciones de lo que Cartwright llama (*ibid.*, pp. 50 y ss,) una “máquina nomológica”:

It is a fixed (enough) arrangement of components, or factors, with stable (enough) capacities that in the right sort of stable (enough) environment will, with repeated operation, give rise to the kind of regular behaviour that we represent in our scientific laws.

Por ejemplo, dadas las leyes de Kepler, se persigue construir una máquina donde, apelando a propiedades mecánicas, se pueda dar cuenta de esas regularidades. Dada la gran cantidad de condiciones *ceteris paribus* con las que la máquina nomológica ha sido construida, es de esperar (*ibid.*, p. 57) que “lo que sea verdad en un caso lo sea en todos los demás”. Las leyes, entonces, ni son incondicionales ni universales (*ibid.*, p. 59); son

²⁰⁵ *Op. cit.*, p. 209.

VII. ANÁLISIS PRAGMÁTICOS DE LA REPRESENTACIÓN

generadas por una máquina. La ley de Coulomb, por sí sola, no nos dice nada acerca del movimiento de un par de partículas. Hay que fijar el movimiento situando las partículas en un espacio nomológico; entonces se podrá determinar su movimiento. Pero no hay teorías que representen los fenómenos (*ibid.*, p. 179), ni fenómenos que sean representados por las teorías.

Ni siquiera (*ibid.*, p. 58) los principios que sirven de puente materializan completamente el contenido abstracto de los conceptos. Todavía es algo demasiado formal como para ser manejado por la ciencia. Necesitamos conocer las propiedades y los materiales reales, antes de poder construir algo. La teoría es una reconstrucción que incluye principios, pero no técnicas de resolución (*ibid.*, p. 194). En este punto, se dan relaciones matemáticas, pero poco acerca del material real a partir del cual se construyen, por ejemplo, los aparatos de la superconductividad. Por ello Cartwright insiste:

Theory, as we generally reconstruct it, leaves out most of what we need to produce a genuine empirical prediction.

El dominio es determinado por el conjunto de *stock models* donde la teoría provee de descripciones matemáticas (*ibid.*, pp. 209-210). Que la teoría prediga en estas circunstancias controladas, no significa que conozcamos qué aspectos del mundo han sido representados. En todo caso, y aunque se supusiera que las leyes son verdaderas, nunca podrían ser universales (*ibid.*, p. 4). Los modelos termodinámicos altamente abstractos necesitan bajar a la realidad, igual que ocurre con los conceptos abstractos de la Mecánica.

Todo esto sugiere que la complejidad del mundo no puede ser tratada de modo uniforme, con un solo método. Las leyes son limitadas, no se aplican siempre, y una ley que se aplica en determinadas circunstancias sólo explica en presencia de esas circunstancias (1991, p. 155). Para tratar con el mundo real, no se puede proceder deductivamente, ni siquiera mediante aproximaciones deductivas:

But treatments of real systems are not deductive; nor are they approximately deductive, nor deductive with correction, or plausibly approaching closer and closer to deductivity as our theories progress²⁰⁶.

²⁰⁶ Cf. 2001, p. 9

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Así pues, no hay reducciones, ni jerarquías: no hay un sistema unificado de la ciencia, ni siquiera de la Física. Las disciplinas cooperan, los límites son flexibles; pero no hay universalidad, puesto que incluso las mejores teorías están limitadas en su alcance.

The laws that describe this world are a patchwork, not a pyramid²⁰⁷.

Las disciplinas crecen de forma independiente, con diferentes niveles de abstracción y diferentes principios. La ciencia está dividida en muchos compartimentos: hidrodinámica, genética, teoría del láser, etc., y aunque conozcamos ciertas leyes para estos dominios, no sabemos muy bien qué ocurre en las intersecciones de estos campos (cf. 1991, p. 50). Más aún, para la mayoría de las cosas que ocurren en la naturaleza no tenemos ninguna ley.

Los científicos no tienen lentes especiales para ver la estructura de la naturaleza. No hay revelación del lenguaje del libro de la naturaleza (cf. 2001, p. 46). Con la excepción de los sistemas planetarios, las aplicaciones exactas de las leyes de la Física sólo se dan en los modernos laboratorios, artificialmente, en pequeños ambientes totalmente controlados. Es decir, no sirven para todo. Ni siquiera una ley acerca de las partículas fundamentales de la naturaleza sería universal, en el sentido de cumplirse en todos los dominios.

No hay unificación, entonces, sino diversificación²⁰⁸. Cartwright defiende (*op. cit.*, p. 16) un realismo local donde se dan muchas situaciones y una amplia variedad de dominios. Por eso habla de los “perniciosos efectos de la creencia en una ley como regla universal y en un único sistema de la ciencia”. En todo caso, ya que muchos conceptos sólo organizan y no representan las propiedades reales (*ibíd.*, p. 18), el poder unificativo no representa ningún papel en la descripción de las causas.

²⁰⁷ Cf. 2001, p. 1.

²⁰⁸ Ni siquiera la Economía o la Física son ciencias universales. Para Cartwright, la Física trabaja con conceptos de gran poder deductivo, pero de aplicación limitada, mientras que la Economía tiene conceptos que se aplican de forma más general, pero cuyo poder deductivo requiere el uso de modelos abstractos.

VII. ANÁLISIS PRAGMÁTICOS DE LA REPRESENTACIÓN

B) ¿Cuál es el papel de los modelos en este realismo que cree en causas, en leyes de bajo nivel, fenomenológicas, y no cree en teorías, en las leyes fundamentales? En principio, Cartwright piensa, como en el enfoque semántico, que las teorías abstractas proporcionan modelos para representar el mundo; sin embargo, no cree que representen lo que sucede, ni que se adecuen a los hechos (cf. 2001, p. 180). Los modelos interpretativos, los que surgen directamente de la teoría, no son descripciones de sistemas físicos. La Mecánica Clásica (cf. *op. cit.*, p. 12) trata directamente con masas compactas, cuerpos rígidos y puntos sin extensión donde se sitúan las cargas. Estos modelos no son exitosos cuando se trata de describir lo que sucede con los cuerpos elásticos, con los fluidos, o, en general, con los cuerpos reales.

Cartwright se muestra cautelosa respecto al isomorfismo que estos modelos puedan mostrar con la realidad. Los modelos unidos al Hamiltoniano no deben pensarse como imágenes de sistemas físicos aislados, sino como descripciones abstractas que necesitan seguir concretándose para tener significado empírico²⁰⁹.

The fundamental laws of the theory are true of the objects in the model, and they are used to derive a specific account of how these objects behave. But the objects of the model have only ‘the form or appearance of things’ and, in a very strong sense, not their ‘substance or proper qualities’²¹⁰.

Así que se necesita una clase de modelos que *medie* entre la teoría y el mundo. Cartwright se une entonces, sobre todo a partir de *The Dappled World*, a la concepción de modelos como mediadores, elaborada por Morrison (2001), y opuesta al enfoque semántico, por cuanto los modelos no forman parte de la teoría.

Theories in physics do not generally represent what happens in the world; only models represent this way, and the models that do so are not already part of any theory²¹¹.

Estos son los “modelos representativos”, llamados en *How the Laws of Physics Lie* “modelos fenomenológicos”:

²⁰⁹ Es importante destacar que Cartwright no está pensando (*op. cit.*, p. 191) que el Hamiltoniano pueda ser sustituido por otros sistemas físicos.

²¹⁰ Cf. 1991, p. 17.

²¹¹ Cf. 2001, p. 180.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

The route from theory to reality is from theory to model, and then from model to phenomenological law. The phenomenological laws are indeed true of the objects in reality -or might be; but the fundamental laws are true only of objects in the model²¹².

En general (1991, p. 140), los modelos se construyen para concluir el comportamiento del fenómeno y sus causas. Pero los modelos no describen lo que sucede realmente. No es posible porque la teoría limita mucho lo que puede ser representado. En este sentido, un modelo (*ibíd.*, p. 153) es un “trabajo de ficción”; algunas propiedades de los objetos del modelo se corresponden con otras de los objetos modelados; pero otros se introducen por conveniencia, para tratar matemáticamente la realidad. Entre estos, hay ciertas idealizaciones de la Física, como potenciales infinitos, cuerpos rígidos perfectos, planos sin ficción, etc. Hay propiedades que pueden considerarse como casos límite, a los cuales podemos aproximarnos tanto como queramos. Pero otros ni siquiera: son puras ficciones, como las distribuciones de probabilidad de la Mecánica Clásica Estadística.

También los principios-puente de la Mecánica Cuántica son pocos (*ibíd.*, p. 143), y tratan con ficciones altamente abstractas. Su número relativamente pequeño hace posible un consenso dentro del cual realizar explicaciones teóricas y permitir pocos parámetros para construir el modelo; posibilita también la construcción, evaluación y eliminación de los modelos²¹³.

Explicar un fenómeno, en Física, es encontrar un modelo que lo sitúe en un marco teórico y que permita derivar analogías para las complicadas leyes fenomenológicas verdaderas en ese fenómeno (cf. 1991, p. 152). Por supuesto, los modelos varían dependiendo de lo que nos interese. La decisión no viene dada sólo por los hechos. No hay un modelo correcto: algunos solucionan determinados problemas, mientras que otros pueden tener otras ventajas. Hay muchos medios distintos de aproximación, y compararlos no es una tarea sencilla (*ibíd.*, p. 121).

Además, los modelos se construyen de conceptos tomados de diferentes disciplinas. Hay explicaciones teóricas alternativas para un mismo fenómeno. Los modelos se

²¹² Cf. 1991, p. 4.

²¹³ Como vemos, la noción de la palabra “modelo”, en Cartwright, es amplia, y se emplea no sólo para indicar que falta una teoría, sino también donde hay un artefacto generalmente ficticio utilizado para aplicar una teoría matemática a la realidad.

VII. ANÁLISIS PRAGMÁTICOS DE LA REPRESENTACIÓN

construyen para diferentes propósitos, con diferentes ecuaciones: no tiene sentido preguntarse por el verdadero. Los modelos se complementan.

Por ejemplo (cf. 2001, pp. 193-194), podemos describir cuánticamente para predecir los efectos de la superconductividad utilizando las ecuaciones del modelo de Ginzburg-Landau. Estas ecuaciones no son derivadas directamente a partir del Hamiltoniano, sino combinando aspectos de la Termodinámica, Electromagnetismo y Mecánica Cuántica. No hay una representación de los mecanismos causales en este modelo. Se aceptan ciertos postulados sencillos que se justifican por el éxito de sus predicciones.

También en la construcción de láseres, a la teoría cuántica se le añaden premisas que no forman parte de las teorías; exige colaboración, y conocimiento que se busca en otros lugares (*ibid.*, p. 181). Para realizar un modelo de superconductividad se necesita Electrodinámica, Mecánica Cuántica, Termodinámica, así como las relaciones que puedan darse entre ellas. La construcción es creativa y cooperativa: se va más allá de los principios teóricos²¹⁴.

Incluso Cartwright afirma (*op. cit.*, pp. 228 y ss.) que la Mecánica Cuántica y la Clásica son ambas necesarias, y se relacionan una con otra. Si es conveniente, se puede adoptar un enfoque clásico, por lo que siempre existe la posibilidad de una modelización mixta.

We can and do build models in which classical features affect the quantum description, and the reverse²¹⁵.

Incluso suponiendo que la Mecánica Cuántica fuera cierta, y que sus funciones de estado dieran descripciones correctas del mundo, eso no haría falsa la Mecánica Clásica (*ibid.*, p. 231). Ambas descripciones podrían ser verdaderas al mismo tiempo y respecto del mismo sistema. No son incompatibles, señala Cartwright, al menos en principio:

²¹⁴ En *The Dappled World*, el énfasis no está en la verdad o falsedad de las leyes fundamentales y teorías, sino en su potencialidad para unirse entre sí desde distintas disciplinas y ramas para formar modelos seguros y predictivos. Véase 2001, p. 81.

²¹⁵ Cf. 2001, p. 229. Véase también *op. cit.*, p. 215: “In addition to the quantum state, some systems will be correctly described by classical states as well. Both descriptions may be true of the system and true of it in exactly the same sense”.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

There is no automatic incompatibility between quantum and classical states. Although contradictions may be unearthed in one case or another, they are not automatic²¹⁶.

Aunque algunos sistemas sean representados, en ciertas situaciones, por las eigenfunciones, nada nos asegura que, dada cualquier situación, un modelo puramente cuántico encaje allí (*ibid.*, p. 217). En general, no es posible construir un modelo que se adecue para cada circunstancia.

Parece que está claro entonces por qué Cartwright rechaza el isomorfismo. Sin embargo, la relación que afirma entre la realidad y el modelo recuerda a la de una imagen, a un espejo, tanto en Cartwright (1991, p. 153):

The success of the model depends on how much and how precisely it can replicate what goes on.

Como en Cartwright (2001, p. 193):

Models, I say, *resemble* the situations they represent.

C) El argumento más destacado contra la inferencia a la mejor explicación (IME) vuelve a ser, en Cartwright, el “argumento de la redundancia” (cf. 1991, p. 90):

For any given set of phenomena, in principle there will always be more than one equally satisfactory explanation, and some of these explanations will be incompatible. Since not all of them can be true, it is clear that truth is independent of satisfactoriness for explanation.

Es decir, los datos empíricos no determinan unívocamente la teoría, y siempre puede haber otra teoría que sea capaz de derivar los mismos resultados. El argumento es el mismo que Duhem o van Fraassen: la verdad no tiene que ver con la explicación. El poder organizativo no dice nada a favor de la verdad. Ya que para Cartwright (*ibid.*, p. 85), las leyes explicativas resumen el contenido empírico de las leyes fenomenológicas, nada indica que sean verdaderas.

El éxito de un modelo depende de la aproximación a la verdad de las leyes que sean capaces de derivar. Las leyes fenomenológicas pueden ser obtenidas de muchas maneras. Pero la ley de cobertura supone que sólo hay una explicación correcta para

²¹⁶ *Ibid.*, p. 217.

VII. ANÁLISIS PRAGMÁTICOS DE LA REPRESENTACIÓN

cada fenómeno. Un modelo correcto de la explicación tendría que negar esto; tendría que destacar que no utilizamos una teoría, sino varias dependiendo de la naturaleza de los problemas. Lo que cuenta, al final, es el éxito, y las grandes teorías explicativas sólo funcionan en ocasiones, en modelos muy restringidos. Quienes creen en la ley de cobertura, según Cartwright (cf. *op. cit.*, p. 49) tienden a pensar que la naturaleza está bien regulada; que hay una ley que cubre cada caso. Pero lo cierto es que nada está determinado en detalle.

Además (*ibid.*, p. 45), las leyes generales son más bien escasas: ni el papel del ADN en la formación de las características genéticas, ni la aparición del arco iris, por ejemplo, pueden explicarse mediante un modelo de cobertura; simplemente, no hay leyes que las cubran. Muchos de estos fenómenos se explican científicamente, pero no tienen leyes que las subsuman; como mucho son generalizaciones que funcionan en condiciones especiales, *ceteris paribus*, como la ley de Snell, que sólo funciona para medios isotrópicos. Por estas razones es necesario otro modelo de explicación que dé cuenta de la práctica real científica.

Cartwright piensa entonces que la creencia debería desplazarse desde las leyes explicativas hasta las causas reales de los fenómenos. En estas explicaciones causales (*op. cit.*, pp. 10-11), la verdad es esencial a la explicación, porque lo que está en juego son las leyes causales de bajo nivel que describen fenomenológicamente la situación. A diferencia de las leyes teóricas, como la ecuación de continuidad de Boltzmann, que son fórmulas abstractas que no describen las circunstancias particulares, las historias causales, al usar leyes fenomenológicas, nos dicen qué ocurre en situaciones concretas.

Unlike theoretical accounts, which can be justified only by an inference to the best explanation, causal accounts have an independent test of their truth: we can perform controlled experiments to find out if our causal stories are right or wrong²¹⁷.

Las leyes fundamentales, que soportan el *explanans* en la explicación nomológica, no eran capaces de asegurarnos ni siquiera la existencia de las entidades teóricas postuladas por la teoría. El énfasis, no en la mejor explicación, sino en la *causa más probable*, hace que tengamos una descripción de las causas reales, por lo que podemos rechazar las leyes fundamentales y aceptar las entidades teóricas (cf. *ibid.* p. 6).

²¹⁷ *Op. cit.*, p. 82.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

La experiencia nos dice cuál es esa causa más probable; no la observación a secas, sino el experimento, que nos permite aislar las causas verdaderas y eliminar las demás. Así (*ibíd.*, p. 8) podemos creer en las entidades postuladas por la Mecánica Cuántica, no por su poder unificador u organizativo, sino por los papeles concretos que la teoría asigna a tales entidades.

La “causa más probable”, dentro de un proceso físico, corresponde a un ente específico, a una entidad teórica, a una cosa real que causa efectos que pueden determinarse:

An explanation of an effect by a cause has an existential component, not just an optional extra ingredient²¹⁸.

Podemos manipular la causa y ver el cambio que se produce en sus efectos, mediante oraciones causales que sean probadas experimentalmente de distintas maneras. En tales explicaciones, las leyes obtenidas no serían cuestión de conveniencia, sino verdaderas o falsas. Tendríamos una única historia causal, ya que, a diferencia de los marcos teóricos, las propiedades causales no son refutables. El argumento de la redundancia no afectaría a este tipo de inferencias. Concluyendo que hay electrones o protones dentro de un cámara vacía yo estoy infiriendo de los efectos a las causas. En caso contrario (cf., *op. cit.*, p. 99):

If there are no electrons in the cloud chamber, I do not know why the tracks are there.

Mediante la manipulación causal, podemos saber que un electrón existe, sin que tengamos que creer en los diferentes marcos teóricos que hablan sobre esta entidad. Sus propiedades causales, las que realmente causan los efectos, la carga, el espín, la masa, etc., nos indican que el electrón no pertenece necesariamente a ninguna teoría, y que resulta independiente de ellas.

7.4. En defensa de las leyes fundamentales

²¹⁸ *Ibíd.*, p. 91.

VII. ANÁLISIS PRAGMÁTICOS DE LA REPRESENTACIÓN

Como puede deducirse de todo lo que llevo expuesto en esta tesis, no comparto la gran mayoría de las afirmaciones de Cartwright. Algunas de ellas las he criticado con ocasión de mis objeciones al realismo experimental de Hacking, y no las repetiré aquí. Me limitaré a criticar una serie de puntos que considero importantes para el argumento general siguiendo el orden precedente de los apartados A, B y C.

A) En relación con las leyes fenomenológicas y la visión *patchwork* de la ciencia, tengo que decir, primero, que *todas las leyes científicas, sean de bajo, alto o nivel intermedio, describen y predicen*. La razón es que simplemente constituyen ecuaciones y, como tales, no tienen límites en sus predicciones: basta con despejar una variable en función de las demás, para obtener toda una serie infinita de predicciones. Además, hay leyes de bajo nivel que explican, además de describir, y leyes de “alto nivel” que, aunque explican, necesitan a su vez ser explicadas. Todo depende del nivel de abstracción donde situemos la explicación. Los modelos de Ptolomeo “explican” si con ello se quiere indicar que salvan las apariencias y permiten predecir las posiciones de los planetas. La ley de Stefan “explica” si explicar es ser capaz de generar los resultados experimentales de la radiancia espectral en función de la temperatura. Pero estos modelos, al construirse con hipótesis de bajo nivel, no deducidos de los pilares de la teoría, necesitan una explicación teórica. Son modelos de datos sólo justificados empíricamente y que necesitan una fundamentación más ajustada al conjunto de leyes fundamentales **T**. Porque incluso las leyes de más alto nivel que explican el éxito de estos modelos, como las leyes de Kepler, o la ley de Plank, son explicadas, a su vez, por otras leyes más comprensivas, como las leyes de Newton, o las leyes de la Mecánica Cuántica. Todas ellas describen, porque establecen relaciones entre magnitudes físicas, y todas ellas predicen, porque hacen mucho más que organizar las leyes que se encuentran por debajo. Respecto de la explicación, aunque todas “expliquen”, cabría hablar de explicaciones más o menos fundamentadas, dependiendo del nivel desde donde hayan sido deducidas. En cualquier caso, la línea que establece Cartwright entre leyes fenomenológicas y leyes fundamentales, basada en que las primeras describen y las segundas explican y predicen, no creo que pueda sostenerse.

En segundo lugar, *los modelos directamente contruidos a partir de las leyes fundamentales se refieren en todo momento y directamente a la realidad*. Para construir turbinas, bombas, intercambiadores de calor, generadores y toda una central eléctrica,

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

basta con conocer los principios de conservación de la energía, el segundo principio de la Termodinámica y la determinación de propiedades termodinámicas²¹⁹. El éxito de que la central funcione, no se debe -principalmente- a las aproximaciones efectuadas en los cálculos, sino a las leyes fundamentales que lo rigen. Los modelos abstractos, en Termodinámica, son los fundamentos de todas las aplicaciones prácticas, y, sin sus leyes, no hay modelos. Que una ley sea más abstracta no significa que pierda realidad empírica; al contrario, y puesto que tiene un alcance mayor, la gana. *El mayor o menor nivel de abstracción que muestra una ley se refiere a su alcance, no a su mayor o menor contacto con la realidad*: las propiedades físicas, su referencia última, sigue siendo la misma, y tanto contenido empírico tiene el principio de Arquímedes como las ecuaciones de Lorentz, porque no cambia la naturaleza de los términos que presentan en sus ecuaciones.

En tercer lugar, *tan abstracta es la fuerza como pueda serlo la masa, la carga, la posición o la aceleración; y, al revés, tan concretos son estos términos como puedan serlo la energía, la temperatura o el momento angular*. Todas las dimensiones están en pie de igualdad, y ninguna es más fundamental que las demás, ni depende de otras²²⁰. La única dependencia está en qué dato se conoce y cuál no, a la hora de despejar ecuaciones y poner una en función de las demás²²¹. Si la fuerza es un término abstracto, y supuestamente se “concreta” a través de la masa y de la aceleración, ¿qué ocurre con las demás ecuaciones donde aparece la fuerza? Porque la fuerza también podría “definirse” mediante la ley de Coulomb, en cuyo caso tendríamos de nuevo que dos términos concretos (la posición y la carga) “definen” a uno más abstracto. ¿Cuál de estas dos ecuaciones “concreta” mejor la fuerza? Y si tomáramos otra ecuación, donde la fuerza apareciera en función de la intensidad, la longitud y la inducción electromagnética, mediante la segunda ley de Laplace, aquí tendríamos (presumiblemente) dos términos abstractos y un término concreto. ¿Cómo se “concretaría” ahora la fuerza? Y, en general, ¿cuál de todas estas ecuaciones sirve para “definir” o “concretar” la fuerza? ¿O hay alguna

²¹⁹ Cf. Moran y Shapiro (1994, p. 432)

²²⁰ Aunque haya casos de derivación, de forma que a partir de la fuerza y del espacio pueda obtenerse el trabajo o la energía, por ejemplo, *eso no las hace más fundamentales*. La distinción que hace el Sistema Internacional entre dimensiones básicas y derivadas es una *convención*.

²²¹ Cf. mi crítica (Cap. IV) a la distinción de Sneed entre términos T-teóricos y T-no-teóricos.

VII. ANÁLISIS PRAGMÁTICOS DE LA REPRESENTACIÓN

que resulta más fundamental que las demás, y que de alguna manera muestre “mejor” su contenido empírico?

Lo cierto es que esta división entre términos abstractos y términos concretos, basados presuntamente en los poderes explicativos de los primeros y en los poderes descriptivos de los segundos, sigue recordando a las reglas de correspondencia del positivismo lógico, donde el significado de los términos llamados “teóricos” dependía del significado de los términos “observacionales”. Ahora la distinción es entre lo abstracto y lo concreto. Pero *no hay unos términos más abstractos que otros*, y todos se refieren del mismo modo a la realidad a través de la sensación, y a través de una medida de esa experiencia. Todos ellos pueden medirse directamente por medio de un aparato sensible a sus incrementos y variaciones, y todos son igual de reales: fuerza, trabajo, aceleración, tiempo, espacio...; aunque podamos poner unas en función de otras, no por eso van a resultar unos más abstractos que otros. En vez de considerar que la carga, el tiempo, el espacio, o la masa son las que vamos a utilizar para definir por convención las demás dimensiones y unidades, podríamos haber escogido la energía, la aceleración, la temperatura y el peso, y poner las demás como una combinación suya. Desde luego, el mismo poder descriptivo, explicativo y predictivo tienen todas ellas²²².

En cuarto lugar, respecto de la afirmación de que “las leyes son verdaderas en el modelo”, tengo que decir que un modelo es un conjunto de leyes más un rango de aplicación expresado en enunciados de observación. La esencia del modelo son las leyes que se utilizan para construirlo. El modelo se identifica con sus leyes, con los algoritmos que relacionan y vinculan las variables, a los que se añaden las condiciones iniciales, básicas para la resolución del problema. Un modelo es una fórmula matemática aplicada a la realidad física; como tal, se caracteriza por el número ilimitado de sus predicciones. Si esas predicciones no se comparan con la realidad, con una serie de medidas, no es posible hablar ni de “verdad” ni de “aproximación”. Verdad es correspondencia, y si no se comparan resultados las leyes no son verdaderas ni falsas. *Decir que las leyes son verdaderas “sólo” en el modelo es enunciar un juicio analítico del tipo $A = A$,*

²²² Tampoco creo que los conceptos económicos sean de naturaleza diferente a los conceptos físicos, con excepción de que apuntan a aspectos económicos de la realidad. Pero la inflación, el producto interior bruto, o la tasa de ocupación, son términos igual de universales que los que se refieren a la realidad física. Siguen siendo *indicadores*, relacionados entre sí mediante leyes.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

*donde el modelo, justamente, coincide con sus ecuaciones y sus predicciones. El modelo es igual a sí mismo, y no hace falta ningún experimento para comprobarlo*²²³.

En quinto lugar, que el modelo no “encaje” totalmente en la realidad es algo perfectamente normal. La adecuación, su aceptabilidad, es relativamente mayor o menor, y nunca es isomórfica. Pero eso es porque el modelo no puede tener en cuenta todos los factores en todos los lugares y en todos los tiempos para todo tipo de circunstancias. Se trata, precisamente, de proporcionar unas directrices básicas, una serie de reglas metodológicas para la construcción de los modelos. Esto es lo que hace una teoría, pero es parte de su esencia no tener en cuenta todos los factores posibles; justamente, se trata de simplificar la realidad, de idealizarla. Pero la abstracción con la que una teoría trata a la realidad no tiene por qué significar pérdida de la realidad. Nuestro comportamiento, aquí, tiene que ser más aristotélico que platónico: abstraer significa destacar rasgos fundamentales. Cartwright dice (1991, p. 162):

The fundamental laws do not govern reality. What they govern has only the appearance of reality and the appearance is far tidier and more readily regimented than reality itself.

La realidad es muy compleja, y nunca conoceremos todo acerca de ella. Pero la cuestión científica es: “¿podemos conocer algo de ella?” Y la ciencia dice “sí”, y su conocimiento es de esencias, y no de apariencias. Porque sin tener en cuenta que tan metafísico es hablar de esencias como de apariencias, y que una cosa no puede separarse de otra, al menos en nuestro discurso, la ciencia apunta a las esencias de las cosas,

²²³ Hay otra manera de entender la afirmación de que “las leyes son verdaderas sólo en el modelo”, y es suponer que en la realidad nunca se cumplen las condiciones ideales en las que las leyes resultarían verdaderas. Pero la forma lógica de una ley corresponde a un condicional “ $p \rightarrow q$ ”, donde p son las condiciones en las que se afirma la verdad de q . Si p no se da, es decir, si p no es verdadero, *el enunciado condicional resulta verdadero*, y no falso. Esto supone que cualquier ley que especifique un antecedente falso es verdadera lógicamente. Pero la Física necesita la verdad del antecedente, para comprobar de modo efectivo lo especificado por el consecuente. Así, ya que en p se especifican las condiciones experimentales donde supuestamente se va a cumplir lo que dice q , un científico puede acercarse, hasta cierto límite, a esas condiciones experimentales, haciendo que la temperatura permanezca constante, por ejemplo, cuando quiere confirmar la ley de Boyle. A partir de aquí, puede comprobarse la precisión de la ley, su ajuste experimental, con relación a una serie de medidas. El error estadístico de la ley, a la hora de subsumir las medidas, incluye su grado de verdad... y de falsedad. *Lo verdadero y lo falso son términos relativos que se incluyen en el concepto de precisión.*

VII. ANÁLISIS PRAGMÁTICOS DE LA REPRESENTACIÓN

porque destaca de la realidad únicamente lo que le interesa, y deja lo demás como si no existiera. La esencia física de un fenómeno es una serie de propiedades que la representación trata como si obedecieran a una serie de reglas. La esencia de una cosa es una ecuación, ni más ni menos. En este sentido, la misma esencia física tiene una mesa que un muón: una serie de propiedades ligadas por ecuaciones. La ciencia sistematiza la realidad, y no la abandona ni deja de referirse a ella en ningún momento.

B) Respecto del papel de los modelos en el conjunto de la metodología, tengo que indicar, primero, que coincido con Cartwright y con el enfoque general de los “modelos como mediadores”, porque tampoco considero que los modelos formen parte de las teorías, ni que éstas queden definidas extensionalmente por su conjunto de aplicaciones exitosas. Para predecir, en ocasiones, y porque el número de incógnitas a resolver sea mayor que el número de ecuaciones disponibles, se necesita efectuar una serie de aproximaciones a partir de las leyes más generales, que nos conduzcan a un modelo más simple con el que poder tratar matemáticamente la realidad. Lo que niego es que estos modelos no se obtengan deductivamente, a partir de las leyes más generales. Y pienso así porque un modelo, desde el punto de vista lingüístico, es fundamentalmente un argumento lógico, una serie de premisas que tienen que estar expresadas en el lenguaje objeto de la Física, esto es, en forma de ecuaciones. En las líneas de la derivación sólo puede haber ecuaciones, que incluyen leyes, aproximaciones y condiciones de contorno. Y lo que se obtiene, las conclusiones, siguen siendo ecuaciones, fórmulas matemáticas donde los términos se refieren directamente a la realidad.

Por ejemplo, para obtener la ecuación que modeliza el “efecto Venturi”, que es el efecto de succión producido por un caudal de fluido cuando una tubería se estrecha, y que es aplicado en aparatos como contadores de agua, difusores o pulverizadores, se necesita la derivación a partir de leyes mucho más generales, como puede ser el teorema de Bernouilli. Esta ecuación, a su vez, ha sido derivada de las ecuaciones generales del movimiento de Euler, más una ecuación de continuidad que en conjunto forman un sistema de cuatro ecuaciones en derivadas parciales que representan el movimiento más general de un fluido. A partir de aquí, si suponemos que a) el régimen es permanente; b) que el régimen es irrotacional; c) que el campo de fuerzas exteriores es sólo gravitatorio; y d) que el líquido es incomprensible, entonces tenemos el teorema de Bernouilli, cuya aplicación directa al efecto de Venturi soluciona directamente el problema de cal-

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

cular la altura en función de la velocidad y de la presión del fluido. Todas estas ecuaciones se obtienen mediante suposiciones físicas, algunas de las cuales pueden reproducirse en el laboratorio, donde, por ejemplo, puede obtenerse un régimen permanente, que no varía en función del tiempo. Algunos factores se hacen cero, y otros son sustituidos por expresiones más simples. En todos los casos, *hay una ecuación que expresa la simplificación o la suposición.*

Todo lo que se ha dicho es para líquidos perfectos, no viscosos e incomprensibles, es decir, aquellos que no presentan resistencia a los esfuerzos cortantes, y cuya densidad no varía por mucha presión a la que se le someta. ¿Existen en la realidad estos fluidos? Tal vez no, pero no por eso estos modelos son “ficciones”. Los modelos se aproximan a la realidad porque la descomponen en unidades elementales e ideales a partir de las cuales se añaden correcciones, o se construyen los modelos más complejos. Pero lo que buscan estos modelos básicos no es un isomorfismo con la realidad, un encaje total, ni una realización; lo que pretenden es sintetizar la información básica a partir de la cual es posible predecir algo. Si lo tuvieran todo en cuenta, no serían capaces de decir nada acerca de la realidad: serían demasiadas variables. Lo que se busca es un ideal, pero este ideal puede aproximarse a la realidad añadiendo las condiciones particulares en las que tiene lugar un fenómeno. Estas aproximaciones tienen un límite: aquel que dicta el cálculo, porque más allá no se podría predecir nada. Como he expresado en alguna ocasión, tiene que haber un equilibrio entre fundamentación teórica y ajuste predictivo. Hay que saber compaginar ambas facetas, y no dejarse dominar por el ansia de calcular “cueste lo que cueste”, ni por el afán puramente teórico que no permitiera establecer ni una sola predicción. El modelo no es verdadero ni falso, repito, sino más o menos adecuado, más o menos preciso. Pero la precisión total es una tarea inalcanzable, que a lo sumo sirve de guía para la modelización.

Sin una idealización, sin una abstracción, sin una representación que resalte lo fundamental del objeto, no habría ningún tipo de ley, ni siquiera “fenomenológica”. Decir que las leyes son falsas conlleva el mismo error que decir que son verdaderas. Son más o menos *apropiadas*. ¿Por qué suponer que un modelo newtoniano de puntos-masa es “falso” porque no responde bien a cuerpos que no son rígidos? ¿Por qué no se deja que la teoría desarrolle sus modelos a partir de correcciones que lo enriquezcan y lo permitan dar cuenta de estos fenómenos? ¿No sería esto parecido a la “refutación sin perdón” de Popper, sólo porque un modelo básico no dé respuesta para un fenómeno?

VII. ANÁLISIS PRAGMÁTICOS DE LA REPRESENTACIÓN

Dejemos desarrollarse a la teoría y a sus modelos, antes de decir que son completamente falsos²²⁴.

En segundo lugar, nadie está diciendo que la ciencia sea una tarea fácil. De todas las actividades humanas, es sin duda la más complicada y la que requiere mayores dosis de esfuerzo y de paciencia. Resaltar el valor de las leyes fundamentales, como hago yo ahora, no significa pensar que la teoría determina unívocamente los modelos de la realidad, como piensan ciertas corrientes “extensionales”. Ante un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales que caracterizan y sintetizan la información de un sistema, un científico puede tener todavía mucha labor que hacer para resolver un problema particular. La resolución de ecuaciones diferenciales es uno de los campos más difíciles que existen dentro de la ciencia, y puede requerir diferentes métodos de aproximación y cálculo. La teoría no “deja hecha” la tarea. Pero no es menos cierto que constituye el soporte básico para modelizar la realidad, y sin teoría, como ya he repetido alguna vez, no hay modelización alguna.

En este sentido, dentro de las corrientes que minimizan el papel de las teorías fundamentales a la hora de modelizar los fenómenos, sigue siendo común pensar que las leyes fundamentales “sólo” organizan el material empírico real, que vendría expresado a través de leyes de bajo nivel. Pero recordemos lo que era capaz de hacer un simple modelo de datos, en Astronomía o cuando he analizado el modelo de caída libre de Galileo. En estos modelos, supuestamente empíricos, hay algo más que un resumen y una “organización” de los datos: aquí hay una síntesis que va mucho más allá de las medidas originales. El modelo es capaz de generar más o menos los puntos donde ha ocurrido la medida; pero además, predice muchas otras posiciones, infinitas medidas, que reconstruyen la totalidad del fenómeno y no se quedan simplemente en el resumen ni en la organización. Pasemos ahora a las leyes abstractas, y preguntémonos: ¿están organizando leyes, como piensan Duhem y Cartwright, o hacen algo más? Las tres leyes de Newton, ¿resumen leyes, como las de Kepler o Galileo? La ecuación de Schrödinger, ¿resume los hallazgos empíricos de Bohr, Dirac y Einstein? ¿Y por qué, si sólo resumen, es posible avanzar en nuevos campos? ¿No será que también hacen predicciones, con independencia de las leyes que supuestamente “resumen”? ¿No será que se refieren en todo momento a la realidad, y que hacen apuestas concretas por el comportamiento de

²²⁴ Decir que una ley es falsa significa aceptar el isomorfismo.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

determinados fenómenos? ¿O es que habría sido posible llegar hasta la superconductividad o los láseres sin la ecuación de Schrödinger? ¿Habría sido posible descubrir las propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas, magnéticas y ópticas de los sólidos sin las leyes fundamentales de la Mecánica Cuántica?

Pero, además, las leyes fundamentales no sólo fundamentan y predicen, sino que dicen por qué son exitosos los modelos de bajo nivel y por qué, en muchas ocasiones, se equivocan. El “resumen” no es tal: es más bien una *corrección*. *Las leyes fundamentales explican por qué funciona un modelo de menor nivel y por qué deja de funcionar cuando se extiende el alcance*. Las leyes de bajo nivel no se van incorporando al árbol de la ciencia con un “1” definitivo en su valor de verdad. ¡Ese “1”, siempre aproximado, les viene desde arriba, si es que la verdad les alcanza en algún momento! A la hora de corregir un modelo, lo primero que se muestra a la refutación son estas leyes “fenomenológicas”, estos modelos de bajo nivel. Ellos son los candidatos a ser precisados, no las leyes fundamentales. Es decir, ante una anomalía no se empieza derruyendo el valor de verdad de las teorías fundamentales de arriba, porque esto significaría que muchos otros fenómenos, relativamente alejados del fenómeno anómalo, se habrían quedado sin leyes que las explicasen. ¡Lo más lógico es que se las conserve y se las defienda a costa de las leyes menores! ¡La decisión de derrubar una teoría sólo ha surgido en tres ocasiones a lo largo de la historia de la Física! ¡No se llega fácilmente hasta esas alturas! Y la razón es que, efectivamente, hacen mucho más que organizar. Igual que un modelo de datos no sólo organiza o resume datos, sino que va más allá y los sintetiza, una ley fundamental no sólo organiza o resume las leyes de más bajo nivel: va más allá, y las sintetiza.

C) Respecto de los argumentos contra la inferencia a la mejor explicación y su defensa del causalismo, considero, en primer lugar, que ninguna serie de datos determina unívocamente no ya una teoría, sino ningún modelo, por muy “empírico” que sea. Ya he dicho que no hay ningún método inductivo que permita obtener una fórmula matemática que subsuma un conjunto de medidas. En este caso, hace falta talento científico, más precisamente, talento matemático, como el que demostró Newton frente a Hooke a la hora de hallar el modelo gravitatorio de la inversa del cuadrado de las distancias, que sintetizaba todos los logros de Kepler. La “mejor explicación” no existe: es relativa a un conjunto de informaciones que se tengan en un momento dado, histórico. Siempre es posible encontrar una explicación mejor. Ahora bien, no es una cosa tan fácil como pa-

VII. ANÁLISIS PRAGMÁTICOS DE LA REPRESENTACIÓN

rece. No lo puede hacer cualquiera. Matemáticos como Apolonio, Ptolomeo, Descartes, Galileo, Newton, Leibniz o Euler, capaces de encontrar fórmulas matemáticas para todo, más bien escasean. La posibilidad teórica de encontrar un modelo más preciso que los que ya se conocen, ejemplificada por la expresión: “En principio, es posible...”, no tiene una correlación real con la dificultad suprema, máxima, de encontrarlos. Su posibilidad se basa en que, efectivamente, no existen métodos inductivos que determinen un conjunto de datos. Esta posibilidad no quiere indicar nada más que eso: que la verdad es una cuestión de precisión, y que no se dan estructuras isomórficas entre el mundo y la representación. Pero el progreso científico es algo muy complicado y el “todo vale” podría dar la impresión de que es sencillo modelizar la naturaleza, y de que cualquiera podría hacerlo. Y no es así.

El argumento de la no-redundancia, o de la “subdeterminación” puede dar la impresión falsa de que con ligeros retoques una teoría sale siempre bien parada. Y esto no es cierto: las correcciones tienen un límite, que termina justamente cuando se llega a la decisión de refutar o no las leyes fundamentales (como vio muy bien Lakatos). Pero, además, da la impresión de que todos los fenómenos del mundo pueden modelizarse como a uno le venga en gana, utilizando cualquier tipo de leyes, sin mirar de dónde vienen, o casi escogiéndolas por azar. Pero el *stock* de leyes científicas está fuertemente jerarquizado, y no todas las leyes se sitúan en el mismo nivel. Hay implicaciones entre ellas, y muchas de ellas dependen de otras, sin las cuales no existirían. En la “ciencia normal”, por utilizar la expresión de Kuhn, hay un orden fuerte de preferencia a la hora de modelizar los fenómenos. Sólo en ocasiones muy especiales surgen modelos incompatibles que se van apropiando, lentamente, del cuerpo general de enunciados generales considerados como verdaderos. La incompatibilidad, en el sentido fuerte del término, se produce raras veces cuando afecta a los pilares fundamentales de la Física. En condiciones normales, esta incompatibilidad se da en los fenómenos relativamente novedosos, como en estos momentos en Física Nuclear, y tiene un límite y un alcance bien definidos. Es decir, que los fenómenos donde existen modelos incompatibles en el sentido fuerte del término son más bien raros, y ocurren justamente allí donde está dirigida toda la investigación. Pero no esto no constituye el carácter general de la ciencia, porque si no, sencillamente, se volvería loca. Hace falta un orden, una jerarquía, y no todo vale²²⁵.

²²⁵ En cualquier caso, volveré al “problema” de la subdeterminación en el capítulo siguiente, donde distinguiré los casos que pueden darse.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

En segundo lugar, y, en general, por último, quiero destacar que la defensa del causalismo que hace Cartwright me parece muy loable, en una época donde hacer Filosofía y hablar de esencias o causas ya parece sospechoso, como si se nos hubiera olvidado a todos qué significan estas cosas. Ahora bien, reitero que no es necesario ningún causalismo añadido a las teorías científicas, porque éstas ya son, de por sí, causales. Todos los mecanismos manipulativos a los que hace referencia Cartwright pueden efectuarse con la sola presencia de las teorías científicas, porque es lo que hacen, a lo que se dedican, a encontrar relaciones causales, y lo que han venido haciendo siempre. El fundamento de la medida, mucho antes de que se calibren los instrumentos y de que se hagan más precisos, es la respuesta y sensibilidad que ofrece a ciertos estímulos. La causa de que se lea algo en un instrumento se debe a esta sensibilidad del aparato, que lo único que mide son variaciones e incrementos de dimensiones físicas.

La matemática se utiliza para describir cuantitativamente cuáles son esos incrementos de unas dimensiones respecto de otras, cuál es la razón de proporcionalidad que hay entre unas y otras. Pero en matemáticas no hay causas, ni efectos: por eso no hay leyes, en el sentido físico de la palabra.

La ciencia no conoce las causas que están detrás de una dimensión, por ejemplo, la masa. Solamente conoce qué relación tienen entre sí y cómo se influyen. En la Teoría de la Relatividad General la masa no determina las coordenadas del espacio y del tiempo, no lo causa, sino que influye en él de la misma manera que el espacio-tiempo influye en la masa. No hay causas últimas, ni siquiera entre dimensiones básicas. La fuerza no causa una aceleración, del mismo modo que la presión no causa un volumen. Cuando hay fuerza, hay aceleración; cuando hay masa, hay curvatura del espacio-tiempo; cuando hay presión, hay volumen. Y además, cuando mido un aumento de la fuerza estaré legitimado a inferir que aumenta la aceleración, igual que con la masa y el tiempo. Yo conozco cómo se relacionan en la ecuación. Así, hablo de que el aumento de la presión causa un aumento de la temperatura, o de que el aumento de la carga ha causado una mayor intensidad del campo magnético, pero no son causas en el sentido de que originen, fundamenten o den lugar a otras dimensiones. Las causas no crean, se limitan a producir un aumento o una disminución en las otras dimensiones, un incremento, una variación que tiene una magnitud mensurable, y que por lo tanto se puede investigar, descubrir, predecir o comprobar, sin que por ello conozcamos de ninguna manera que es lo que ha causado estas dimensiones, en el sentido de qué es lo que había “detrás”.

VII. ANÁLISIS PRAGMÁTICOS DE LA REPRESENTACIÓN

Tampoco es necesario el causalismo de Cartwright para hacer reales las entidades llamadas “inobservables”. Las propiedades “causales” del electrón, como pudieran ser su carga, su masa, su espín, etc., son calculadas bajo presupuestos teóricos muy fuertes, y no permanecen aislados de la teoría a partir de las cuales se construyen los modelos que calculan sus cantidades. Porque no sólo es necesario apuntar a la causa, hay que *cuantificarla*, y eso se consigue mediante fórmulas matemáticas que ligan de modo causal, efectivamente, las magnitudes implicadas. Pero los modelos, normalmente, se derivan de las leyes fundamentales y ya son causales de por sí.

Para calcular el espín del electrón, por ejemplo, se parte de los principios fundamentales de la Física, que dicen que una partícula que pasa a través de un campo gravitatorio se desvía si está cargada y si está girando²²⁶. El electrón se desvía hacia arriba o hacia abajo según la dirección de su espín. De los once electrones del sodio, cinco girarán en una dirección y cinco en otra, cancelando sus efectos magnéticos. Pero el último electrón no se compensa y caracteriza el desvío de todo el átomo. En un haz de átomos a través de un campo magnético no uniforme la mitad de los átomos de sodio va hacia arriba y la otra mitad hacia abajo, porque la mitad de ellos tiene su electrón undécimo girando de una manera, mientras que el resto lo tiene girando al revés. He aquí la explicación (y el descubrimiento, a la vez) de por qué tiene espín el electrón, en un experimento de Stern y Gerlach de 1921. Hay otros métodos experimentales para calcular el espín, pero todos se basan en leyes físicas fundamentales, que son, precisamente, las que se utilizan para descubrir y cuantificar propiedades reales, observables desde el mismo momento que son detectables y se pueden medir.

7.5. Recapitulación

El mérito de los análisis pragmáticos de la representación es considerar que hay una serie de hechos, leyes de bajo nivel y constantes fenomenológicas relativamente independientes de las teorías, que no cambian cuando lo hace el marco teórico general. Sin embargo, esas mismas constantes se ven *precisadas* gracias a las mejoras teóricas, que permiten calcular por nuevos métodos las propiedades causales implicadas en cada caso.

²²⁶ Véase, por ejemplo, Russell & Larena (1988, pp. 134-135).

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Por lo que respecta a las leyes fundamentales, su labor no consiste tan sólo en resumir el contenido empírico que le suministrarían las leyes de bajo nivel, sino que además indica cuáles son los *límites* de los modelos teóricos contruidos con hipótesis provisionales, al explicar por qué el modelo es exitoso en determinadas circunstancias y por qué falla en otras, normalmente cuando se amplía su alcance.

En general, el papel de las leyes fundamentales es decisivo cuando se trata de investigar nuevos dominios para los que la ciencia busca explicaciones satisfactorias. Experimentar en estos campos novedosos no significa renunciar a la teoría; todo lo contrario, se utilizan como premisas aquellas hipótesis que más se acercan a los enunciados teóricos aceptados como verdaderos, y sólo cuando no hay más remedio se recurre a hipótesis de bajo nivel que salven las apariencias y que puedan resultar relativamente contradictorios con los principios generales considerados como verdaderos. La incompatibilidad, en este sentido, suele darse en aquellos fenómenos que se están investigando en el presente, y para los que no existe, de momento, una teoría que unifique todo el material empírico disponible. Pero la investigación forma parte esencial de la metodología científica, y en ella se procede generalmente mediante tanteos, o prueba y error, utilizando hipótesis provisionales y simplificaciones de las leyes fundamentales básicas con el fin de poder calcular y obtener una guía más o menos firme que permita una sistematización posterior.

Igual que en Matemática, donde ningún teorema forma parte realmente del conocimiento científico hasta que no se ha demostrado rigurosamente, es decir, hasta que no se ha deducido de teoremas más fundamentales, he afirmado que también *en Física un modelo de datos o un modelo teórico de bajo nivel, no queda incorporado al conocimiento real de la Física hasta que no es deducido a partir de una serie de principios que se consideran verdaderos*, y que fundamentan o explican teóricamente todo lo que se sitúa por debajo de ellos. Como dice Hacking, la explicación, normalmente, ocurre después, pero esto sólo indica que la ciencia espera resolver sus contradicciones y que no las considera como algo “normal” con lo que se conviva pacíficamente. Los modelos meramente empíricos, de bajo nivel, *esperan ser justificados desde un punto de vista teórico*, para resolver las posibles contradicciones y ser considerados “subrutinas” dentro de procedimientos más generales. Con ello se persigue *unificar* todo el conocimiento a partir de principios más abstractos, de mayor alcance, sin que la diversificación, la otra característica de la sistematización científica, pierda parte de su importancia. La

VII. ANÁLISIS PRAGMÁTICOS DE LA REPRESENTACIÓN

conexión de todos los compartimentos de la ciencia es una cuestión de eficiencia, de ahorro, como señalara Mach, por lo que resulta completamente natural y nada “peligroso” que la ciencia investigue principios generales comunes a todas sus ramificaciones y disciplinas, tratando de resolver las contradicciones y respetando el contenido empírico de cada una de ellas, que podrá ser obtenido particularizando y aproximando las ecuaciones más generales.

Los modelos teóricos de bajo nivel “salvan las apariencias”, pero sólo *determinadas* apariencias. La *doble justificación, empírica y teórica*, de los modelos, por la que he abogado desde el principio de esta tesis doctoral, permite resolver los casos de incompatibilidad donde el balance predictivo es idéntico, es decir, donde existe una equivalencia empírica que no permite zanjar inmediatamente la cuestión de cuál se ajusta más a las apariencias. Sin embargo, *al ampliar el alcance la subdeterminación empírica desaparece*, pues los modelos justificados teóricamente se muestran útiles no sólo para dominios limitados, sino en otros más generales donde intervienen las mismas magnitudes y dimensiones físicas que en el fenómeno particular donde se produce la equivalencia empírica. De esta manera, uno de los modelos alternativos queda como *aproximación útil*, frente a la supuesta verdad que impera en el modelo más justificado teóricamente, para el que se han empleado en su construcción principios generales (ecuaciones) aceptados como verdaderos.

Porque las leyes científicas son el *fundamento* de los modelos, aunque no lleguen a confundirse con ellos, y según el nivel de abstracción y generalidad de las leyes así será el nivel de justificación de los modelos; es decir, que *el mayor o menor alcance de los modelos depende de las leyes que lo construyen*, entendidas como un conjunto de *reglas metodológicas* que indican lo que la ciencia conoce hasta la fecha de los fenómenos físicos. En todo caso, coincidiendo con Cartwright y con la corriente de los modelos como mediadores, está claro que la teoría no soluciona todos los problemas inequívocamente y que el conjunto de aproximaciones, simplificaciones y suposiciones no puede formar parte de la teoría, debido a las diferencias particulares que existen entre unos fenómenos y otros. La teoría no deja hecha toda la tarea y la ciencia es de una complejidad asombrosa; sin embargo, sin algún tipo de hipótesis teórica, no puede darse ningún modelo.

Por otra parte, también he defendido el carácter *empírico* de los modelos más abstractos y fundamentales, como ideales de comportamiento que permiten una primera

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

aproximación computacional a la cual se añaden correcciones para formar modelos más complejos. La serie de suposiciones transforma los modelos más abstractos en construcciones más simples que permitan el cálculo, pero la fórmula empírica que en su caso se obtiene a partir de estas derivaciones está fundamentada deductivamente por los modelos más abstractos, de los que desciende (*convencionalmente*) el “1” de su valor de verdad hacia los casos particulares. Por esta razón, lo primero que se ofrece a la corrección o a la refutación son las leyes fenomenológicas, de bajo nivel, y no las más abstractas, que tienen un alcance más general y se utilizan para otros fenómenos distintos de aquél donde se produce el desajuste entre predicciones y observaciones.

Porque, como ya he defendido, las leyes no sólo organizan y resumen. Su organización, si quiere conservarse esta palabra, tiene que ver más con una *síntesis* que con un mero resumen. *Las leyes fundamentales tienen el mismo carácter que las leyes de más bajo nivel, y no hay ningún salto cualitativo entre ambas, que no haga referencia a su alcance.* Todas las leyes describen, predicen y explican, aunque existan distintos grados en la explicación, y su descripción sólo atiende a la interacción mutua entre magnitudes físicas en una ecuación, y nunca se pronuncie sobre las causas reales de tal o cual dimensión. En este sentido, todas las dimensiones presentes en una ecuación física, cualquiera que sea su alcance, son igual de abstractas o concretas, según por donde se mire, y en todo caso siempre son empíricas, porque se refieren a la realidad en todo momento y no necesitan aclararse unas en función de otras. El mayor o menor grado de abstracción se refiere al alcance y generalidad de la ley, no a su cercanía con la realidad. Desde este punto de vista, no hay diferencias entre unas leyes y otras, porque para que esto ocurriera tendría que haber alguna diferencia en la naturaleza de los términos que ligan matemáticamente, o en las operaciones que se efectúan sobre ellas. Pero no existen tales diferencias.

Respecto a los ataques que se producen a la “inferencia a la mejor explicación” (IME), he indicado que no es más que el reconocimiento de que nunca tendremos la certeza de que hemos salvado para siempre las apariencias de un fenómeno, y de que un conjunto de medidas puede ser sistematizado en el futuro de distinta forma, aunque esto no sea nada sencillo. Las leyes, efectivamente, no son nunca totalmente verdaderas, pero *tampoco* totalmente falsas. Son más o menos *útiles*, más o menos *precisas*, y tan “isomorfista” es quien dice que son verdaderas como quien afirma que son falsas.

VII. ANÁLISIS PRAGMÁTICOS DE LA REPRESENTACIÓN

Por último, he defendido que no es necesario suponer ningún causalismo que opere al margen de las propias teorías científicas, que ya son lo suficientemente causales como para resolver los problemas de la investigación respecto de las entidades teóricas. Las causas hacen referencia a la dependencia mutua entre dimensiones, y a la variación que experimentan unas en función de otras cuando sufren incrementos en sus cantidades iniciales. Este causalismo, que no tiene nada de extraño ni de metafísico, es el que se utiliza, por ejemplo, cuando se postula una entidad teórica como forma de resolver las contradicciones del sistema con las leyes fundamentales. Como pone de manifiesto el descubrimiento de las distintas partículas elementales, *se parte de enunciados teóricos generales* y, en caso de que *no se cumplan*, se postula un *subsistema* que permita reconducir todo el sistema a la racionalidad, de manera que *vuelvan a cumplirse* los principios generales establecidos como verdaderos. En suma, la “manipulación”, “ingeniería” o “intervención efectiva”, ya se lleva a cabo desde las propias teorías científicas, que utilizan sus leyes fundamentales para seguir descubriendo los aspectos de la realidad que aún no han sido sistematizados por la ciencia.

CAPÍTULO VIII

EL INSTRUMENTALISMO DE LOS MODELOS TEÓRICOS

8.0. Introducción

Una vez que hemos revisado en los capítulos anteriores las distintas clases de realismo en relación con las estructuras teóricas y las entidades postuladas por las teorías, conviene detenernos en los aspectos básicos del instrumentalismo, para elaborar una noción de representación que recoja sus logros fundamentales, y nos ayude a completar una síntesis global entre posiciones realistas e instrumentalistas, salvando lo mejor de cada una de ellas. El objetivo de este último capítulo es triple: 1) defender la equivalencia metodológica entre instrumentos predictivos, como reglas de inferencia, y leyes científicas, como premisas de un argumento; 2) rechazar la subdeterminación empírica, distinguiendo los casos posibles de incompatibilidad teórica; 3) elaborar una noción de racionalidad científica basada en la sustitución, mejora o ampliación de los modelos científicos a partir de los nuevos fenómenos que se van conociendo.

La Sección 8.1: “La equivalencia metodológica entre leyes y reglas de inferencia”, analiza críticamente la tesis de Toulmin de que las leyes científicas son mecanismos de inferencia, y, como tales, no sujetas a verdad o falsedad, sino a su mayor o menor utilidad. Después de defender que el carácter condicional de las leyes científicas supone que su alcance (condiciones de aplicabilidad) queda especificado en el antecedente, sin necesidad de acudir a las cláusulas “*ceteris paribus*”, analizo la diferencia lógica que existe entre una serie de premisas y un conjunto de reglas de deducción que permitieran derivar datos de observación, bien fuera para explicar o para predecir. Mi pregunta es: ¿hay alguna diferencia *metodológica* entre considerar que las leyes sean instrumentos para el cálculo o que sean enunciados verdaderos (premisas) dentro de un argumento deductivo? Lo importante, en cualquier caso, es que *su verdad sea supuesta*, aunque sólo sea de

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

forma convencional, para permitir disponer de una serie de ecuaciones a partir de las cuales desarrollar *pautas deductivas* en busca de nuevos teoremas y predicciones.

La Sección 8.2: “Verdad y éxito empírico”, es una breve exposición del pensamiento actual de Andrés Rivadulla (2004), quien aboga por un abandono de la búsqueda de la verdad en favor del éxito predictivo con la naturaleza. Su tesis fundamental de que *la “aceptabilidad empírica” no es ningún indicador de verdad*, se argumenta mediante la subdeterminación empírica, el rechazo de la inducción como teoría de la credibilidad o justificación de la probabilidad de verdad, el balance predictivo, la existencia de casos límite, la homología entre el vocabulario de las teorías, la superdeterminación de la Física por la Matemática, el papel de las explicaciones teóricas, y, por último, el papel de los modelos teóricos dentro la Física contemporánea.

La Sección 8.3: “Subdeterminación empírica y casos límite”, es una respuesta a los puntos destacados del apartado anterior. Coincido con Rivadulla en el rechazo de la inducción, del isomorfismo, de la similaridad, en el papel fundamental del balance predictivo y del análisis dimensional, así como en la función de la explicación científica. Sin embargo, en el caso de la subdeterminación, distingo entre a) casos de sistemas equivalentes compatibles y complementarios, y b) casos de sistemas realmente incompatibles entre sí. En b), a su vez, distingo: b.1) casos donde es posible aplicar el balance predictivo como comparación racional entre teorías; y b.2) casos donde existe una equivalencia de resultados empíricos a partir de principios incompatibles. Sólo en b.2) se da la subdeterminación empírica, que sin embargo se detiene cuando ampliamos el alcance del conflicto a otras regiones donde intervienen las mismas magnitudes físicas que intervenían en el fenómeno “subdeterminado”. Con relación a los “límites clásicos” entre teorías, rechazo que una constante pueda llegar a tender a algo que no sea precisamente su valor, y defiendo que *en una aproximación no interviene en ningún momento el concepto de límite matemático*. La velocidad de la luz, la constante de Plank, no desaparecen milagrosamente en determinadas regiones que se diferenciarían por su orden de magnitud, sino que siempre están presentes (*su valor ya ha quedado registrado*), aunque no se detecten sus efectos.

La Sección 8.4: “Modelos de Física Nuclear”, presenta el problema de los modelos del núcleo a través del análisis de Boniolo, Petrovich y Pisent (2002). En esta disciplina de la Física nos encontramos con una serie de modelos creados para salvar las apariencias, a falta de una teoría fundamental que unifique todo el contenido empírico

VIII. EL INSTRUMENTALISMO DE LOS MODELOS TEÓRICOS

de los experimentos. Estos “modelos fenomenológicos” parten de un conjunto de suposiciones aceptadas, que buscan simplificar las ecuaciones ante la imposibilidad de una resolución analítica y exacta. Son modelos de validez parcial, limitada, incompatibles entre sí, y que según estos autores no constituyen representaciones pictóricas reales. Sin embargo, defiende que se trabaja para unificar los modelos y reducirlos, en su caso, a una sola teoría. Los modelos se mejoran y precisan, y no están tan aislados del resto de las disciplinas de la Física como pudiera parecer a primera vista. Además, el empleo de analogías nos advierte que estamos dentro del contexto de descubrimiento, a la espera de una justificación teórica posterior. En todo caso, siempre tiene que haber un *equilibrio* entre la fundamentación teórica y el cálculo predictivo, de manera que ningún plano predomine sobre otro.

Por último, en la Sección 8.5: “Racionalidad científica: epistemología y metodología”, expreso mi convicción, con relación al supuesto apoyo que la Física Cuántica proporcionaría al instrumentalismo, de que ninguna teoría es instrumentalista y realista por sí sola, de forma que el debate filosófico no puede ser reducido a un debate científico. Bajo las concepciones realista e instrumentalista subyace un mismo principio metodológico: la suposición de que la naturaleza es sistematizable mediante modelos que se ordenan jerárquicamente como forma de articular el conocimiento con el menor número de principios posibles. Así, traduzco la “heurística positiva” de Lakatos como una serie de modelos cada más complicados, en diferentes dominios, avalados por los modelos que van quedando atrás y que actúan como fundamentos de los nuevos desarrollos teóricos. Finalmente, tras analizar la posibilidad de que los diferentes programas de investigación lleguen a fundirse, expreso mi confianza en el progreso científico, entendido como un proceso en busca de una *mayor precisión o resolución*, sin que ello signifique que algún día pueda alcanzarse una meta definitiva.

8.1. La equivalencia metodológica entre leyes y reglas de inferencia

En el instrumentalismo de Toulmin (1961, p. 55), la función de una teoría era especificar qué es lo que no necesita explicación (los “ideales de orden natural”) y qué es lo que necesita ser explicado. Ya que todos los fenómenos presentan desviaciones del curso natural de los acontecimientos, la teoría añade una serie de leyes que explican tales des-

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

viaciones. Las teorías, para Toulmin (*op. cit.*, p. 57) son sistemas de representación, y resultan más o menos útiles, no verdaderas ni falsas. Todas las leyes tienen un alcance determinado, un dominio fuera del cual no resultan aplicables. La ley de Snell, por ejemplo, a pesar de su apariencia universal, no vale para los materiales cristalinos. Las teorías, por cuanto son representaciones, no son verdaderas ni falsas, sino que tienen la misma naturaleza que los diagramas o dibujos; es su utilidad la que cuenta. Ahora bien, el enunciado donde está contenido la ley sí es verdadero o falso, por lo que cabe comprobar empíricamente si ciertos fenómenos son representados por las leyes.

En su instrumentalismo las leyes hacen algo más que presentar “regularidades”: son mecanismos de inferencia que nos permiten obtener conclusiones acerca de los fenómenos. Como reglas de inferencia, no son verdaderas ni falsas, sino más o menos útiles. Aunque puede pensarse que la ciencia está estratificada, en cuya base se situarían los “ideales de orden natural”, después las leyes más o menos confirmadas, y al final las hipótesis que se están investigando, Toulmin niega que la ciencia tenga el carácter de pirámide lógica, donde pudiéramos proceder por derivación y obtener, por ejemplo, los enunciados de más bajo nivel. La razón que aduce es que las leyes, como reglas de inferencia, no son susceptibles de verdad o falsedad, por lo que no existen relaciones deductivas clásicas entre los estratos de la ciencia. Las teorías son fórmulas que necesitan interpretaciones a partir de los modelos, los cuales proveen de ciertas instrucciones que ligán los términos a la realidad y permiten visualizar los procesos fenoménicos o experimentales dentro de un marco teórico.

Por mi parte, respecto del límite de aplicabilidad de las leyes, considero que una ley ya especifica suficientemente el ámbito donde tiene sentido, y que no hace falta añadir ninguna cláusula “*ceteris paribus*” para saber el alcance de una ley. Las dos primeras leyes de Newton son válidas cuando se aplican a un sistema de referencia no acelerado. El teorema de Bernouilli es válido para un líquido incomprensible en régimen permanente e irrotacional. Si un circuito no tiene receptores, y sólo tiene la fuerza electromotriz de un generador, la potencia máxima útil se consigue cuando la resistencia total exterior del circuito es igual a la interior del generador. La ley de Coulomb es válida para cargas puntuales y en reposo. Si la distribución de la masa dentro de una esfera homogénea no depende de la dirección, produce un campo gravitacional y un potencial idénticos a los de una partícula de igual masa situada en el centro de la esfera. Una partícula con masa en reposo igual a cero se mueve a la velocidad de la luz... *Todas estas*

VIII. EL INSTRUMENTALISMO DE LOS MODELOS TEÓRICOS

leyes son enunciados condicionales. Dado el antecedente, se dispara, por así decirlo, la ecuación. Aunque las condiciones nunca se den exactamente, podemos aproximarnos experimentalmente a estas situaciones ideales, y ésta es la labor de los científicos. Pero lo importante es que el antecedente ya incluye las condiciones en las que el enunciado intenta ser verdadero; no hace falta añadirle cláusulas extrañas, por muy “*ceteris paribus*” que sean. Decir que las leyes no son universales porque especifican condiciones de verdad en el antecedente es como decir que los teoremas de la Geometría no son universales, porque también especifican sus condiciones de verdad. Así, la ecuación de una asíntota sólo tiene sentido si estamos hablando de una parábola o de una hipérbola. Por el hecho de que una elipse no tenga asíntotas, ¿no es universal la ecuación de la asíntota?

La universalidad de una ley física no implica que sea válida para la totalidad del ente, basta que se cumpla en los casos donde dice cumplirse, y no en otros. Una ley más universal tiene un alcance mayor. Y las que tienen, de todas las leyes, el alcance mayor, son llamadas leyes fundamentales. Así que sería bueno dejar que las leyes reposen en el alcance que ellas mismas señalan en el antecedente, y no tratar de generalizarlas para todas las circunstancias, en todos los casos posibles, y en todos los mundos, reales o imaginarios. Además, encontrar el alcance de una ley es parte fundamental de la investigación científica. Con ello se limita la adecuación de los modelos, al tiempo que se buscan otros que cubran más casos que los anteriores. Se asciende paulatinamente, extendiendo el alcance; o al revés, se desciende en grado de abstracción limitando el alcance. Por último, respecto de este tema, me limitaré a reproducir las siguientes palabras de Suppe (1990, p. 204-205):

Cuando se propone una teoría o ley, se la propone para un determinado alcance y el aceptarla supone aceptar que la teoría representa adecuadamente todos los sistemas que caen dentro de dicho alcance [...] Si luego se descubre que la ley es falsa respecto de tal alcance, puede seguirla empleando para aquellos casos en que se mantiene, siendo así una útil aproximación a la verdad para los casos en que funciona.

Pero vayamos ahora a lo que realmente nos interesa de Toulmin: su distinción entre una ley y un instrumento. Según la Real Academia (DRAE), un instrumento es un “conjunto de diversas piezas combinadas adecuadamente para que sirva con determinado objeto en el ejercicio de las artes y oficios”. Es decir, de modo general, un instru-

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

mento es un medio para un fin. Decir que una ley es un instrumento significa que la utilizamos como *medio* para concluir ciertos resultados; en el caso de la predicción, para obtener ciertos resultados empíricos que posteriormente puedan comprobarse; en el caso de la explicación, para comprobar que la teoría, más una serie de condiciones iniciales, es capaz de derivar una serie de enunciados de observación de que se dispone previamente.

Ahora bien, una deducción es un *argumento*, donde se emplean premisas y se obtiene una conclusión. Por poner un ejemplo sencillo, supongamos que a un cuerpo que tiene una masa de 50 kg se le somete a una fuerza de 100 N. El científico puede concluir que el cuerpo tiene una aceleración de $2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Para ello, ha realizado el siguiente argumento:

—1 $F = ma$	Premisa
—2 $m = 50 \text{ kg}$	Premisa
—3 $F = 100 \text{ N}$	Premisa
4 $a = \frac{F}{m}$	Despejando en 1 (Regla algebraica)
5 $a = \frac{100 \text{ N}}{50 \text{ kg}}$	Sustitución 2, 3 en 4 (Regla de sustitución)
6 $a = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Operando en 5 (Conclusión)

En este argumento, los tres primeros enunciados son premisas (su orden, evidentemente, no es importante); es decir, han sido consideradas *como si* fueran verdaderas, lo que se simboliza con una pequeña raya a la izquierda. En la línea 6 se ha obtenido la conclusión. En el argumento, las únicas reglas de inferencia son las meramente algebraicas, las que permiten el paso de 1 a 4, más una regla de sustitución, que permite cambiar el símbolo F de la fuerza y el símbolo m de la masa por las cantidades reales que intervienen en el sistema concreto, es decir, en el cuerpo, y que se supone que se han medido por algún procedimiento.

VIII. EL INSTRUMENTALISMO DE LOS MODELOS TEÓRICOS

Visto de este modo, las leyes no actuarían como reglas de inferencia, sino como enunciados dentro de un argumento, y por lo tanto, desde el punto de vista lógico, susceptibles de ser verdaderos o falsos, aunque la Lógica, por sí sola, nunca pueda pronunciarse sobre la verdad o falsedad de las premisas implicadas, sino solamente sobre la corrección formal del argumento.

Pero el argumento de Toulmin es interesante. Creer que las leyes son reglas de inferencia significa modificar el argumento anterior hasta el punto de dejar sólo los datos de observación dentro de las premisas. La segunda ley de Newton no intervendría directamente en las premisas: no sería un enunciado, no pertenecería al lenguaje objeto, sino que actuaría, por así decirlo, desde fuera, actuando como una regla de inferencia que pertenece al metalenguaje. En otras palabras, la ley, efectivamente, sería un esquema de enunciado, y no estaría sujeto a la verdad o falsedad.

Veámoslo en el ejemplo. Imaginemos las leyes científicas como un gigantesco almacén de reglas de inferencia $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$. Olvidémonos por un momento de las complicadas relaciones deductivas que sin duda se darían dentro del cuerpo de \mathbf{R} , considerado como el conjunto de tales reglas de inferencia. Digamos que la segunda ley de Newton tiene asignado el número "2" dentro del almacén. Los datos iniciales ya son conocidos: el cuerpo tiene una masa de 50 kg y está sometido a una fuerza de 100 N. El argumento sería el siguiente (donde el asterisco indica que el enunciado pertenece al metalenguaje):

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

—1 $m = 50 \text{ kg}$	Premisa	
—2 $F = 100 \text{ N}$	Premisa	
	—1* $F = ma$ Regla de inferencia nº 2	Premisa (del metalenguaje)
	$2^* a = \frac{F}{m}$ Regla de inferencia nº 2 (modificada)	Regla algebraica en 1*
3 $a = \frac{100 \text{ N}}{50 \text{ kg}}$	Aplicación de la Regla de inferencia nº 2 (modificada)	
4 $a = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Operando en 3 (Conclusión)	

Efectivamente, si nos fijamos en la columna de la izquierda, donde sólo aparecen enunciados de observación, parece que en este caso la ley actúa como una regla de inferencia, como un instrumento de derivación; como tal, no sería susceptible de ser verdadero o falso, sino más o menos útil, dependiendo de su capacidad para derivar datos de observación, bien sea para explicar o para predecir. La ley no pertenecería al lenguaje de los hechos, sino al metalenguaje: no sería un enunciado, sino un esquema. Podemos imaginar las demostraciones de la Física como una serie de líneas donde sólo se dan resultados de observación O_1, O_2, \dots, O_n . El conjunto de enunciados teóricos aceptados, **T**, no sería un conjunto de leyes verdaderas L_1, L_2, \dots, L_n , sino un conjunto de reglas de inferencia R_1, R_2, \dots, R_n , las cuales se utilizarían para avanzar en el contenido empírico a través de las líneas de derivación.

Ahora bien, un examen más detenido nos obliga a fijar en lo que antes he llamado “las complicadas relaciones deductivas” que se darían dentro del conjunto de reglas de inferencia, **R**. Realmente, *aunque las leyes científicas actúen como reglas deductivas dentro de un nivel superior, no por eso dejan de actuar de premisas*. En el argumento que he esbozado más arriba, este hecho viene expresado mediante las líneas 1* y 2*. El asterisco indicaba que pertenecen a un nivel superior, y no al lenguaje objeto. Aunque

VIII. EL INSTRUMENTALISMO DE LOS MODELOS TEÓRICOS

en comparación con la columna de la izquierda, con el lenguaje de los enunciados de observación, las leyes científicas ocupen un nivel superior, eso no significa que en ese nivel las leyes científicas no actúen como premisas y, como tales, que no estén sujetas a verdad o a falsedad lógica.

A diferencia de los sistemas formales de la Lógica, donde las reglas de derivación son, en el fondo, tautologías, en el caso de la Física las reglas de inferencia son enunciados empíricos cuya verdad o falsedad no puede resolverse mediante un algoritmo, sino apelando a la experiencia. Las leyes de la Física, aunque sean consideradas reglas de inferencia, son susceptibles de modificación y precisión, y pueden mejorarse en cualquier momento. Por ejemplo, la segunda ley de Newton podría haber sido modificada introduciendo la masa como función de la velocidad del cuerpo.

Efectivamente, todo esto recuerda a la diferencia entre *sistemas axiomáticos* (como el de Whitehead y Russell de 1910, o el de Church de 1956) y *sistemas de deducción natural* (como el de Gentzen de 1934). En los sistemas axiomáticos no se admiten supuestos, ya que todas las expresiones que aparecen en las secuencias demostrativas son una tesis del sistema, una *verdad*²²⁷. El énfasis está más en la pertenencia o no de un enunciado al conjunto de verdades. En los sistemas de deducción natural se hace más hincapié en la convalidación lógica de los argumentos, por lo que en principio, tanto en Lógica como en Física, parece más apropiado para el análisis de los cuerpos deductivos y las demostraciones. Sin embargo, la demostración en sistemas axiomáticos puede tener las virtudes de un sistema natural si en el sistema axiomático se cumple el llamado (*meta*) *teorema de deducción*, que permite convertir las reglas de derivación del sistema axiomático en reglas de inferencia deductivas²²⁸.

Existe entonces una contrapartida axiomática de un sistema de deducción, y viceversa, un sistema deductivo equivalente a un sistema axiomático. Merece la pena, en este sentido, destacar las palabras de Hasenjaeger (1962, p. 73), citado en Vega (1987, p. 133):

²²⁷ Sobre la distinción, virtudes y supuestas preferencias entre sistemas axiomáticos y sistemas naturales, consúltese el análisis de Vega (1987, pp. 123-136).

²²⁸ Cf. Vega (*ibid.*, p. 128): “Si $\vdash \alpha \rightarrow \beta$ es una tesis o un enunciado demostrable, bastará introducir la premisa o el enunciado adicional α para deducir por medio del Modus Ponens $\alpha \vdash \beta$ ”

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Los términos “lógica de tesis” (o “lógica de teoremas”) y “lógica de reglas” no señalan propiamente sino dos aspectos diversos de la lógica. Los teoremas son, por así decirlo, reglas congeladas, y las reglas son teoremas revitalizados.

Lo que a nosotros nos importa de esta distinción lógica es que en el seno de la Física, metodológicamente, ambas cosas dicen lo mismo, y que considerar que una ley sea un instrumento de derivación o un axioma es expresar la misma idea, *la de que su verdad, como mínimo, ha sido supuesta*. Sin embargo, a mi juicio, la concepción instrumentalista se acerca un poco más a la verdad, si se puede hablar de esta manera, al considerar que las leyes operan sobre un conjunto de enunciados de observación aceptados, datos empíricos, actuando como operaciones que arrojan para cada entrada de valores iniciales un valor para la magnitud física que se desea calcular. En todo caso, *lo que interesa en Física no es tanto destacar las verdades de las teorías, cuanto su poder argumentativo, predictivo, en busca de nuevos teoremas*. Lo que un científico necesita, realmente, son pautas deductivas que generen nuevos datos, o que expliquen, también deductivamente, los datos que ya se poseen. Las leyes, en este sentido, son más bien reglas metodológicas para formar modelos, instrucciones para su construcción, como ya he defendido en Calvo (2004).

Esta posición que mantengo es coherente con la que he formulado en el capítulo de los Modelos Semánticos, a la hora de valorar los trabajos sobre los espacios-fase de Suppes y van Fraassen. Las leyes son ecuaciones que operan sobre ciertas cantidades para producir estados de cosas que sean a su vez empíricamente testables. Desde un punto de vista predictivo, arrojan, por así decirlo, a partir de un conjunto inicial de datos, un listado de cómo quedan las cosas en un estado posterior: permiten inferir, concluir, deducir, predecir, adelantarse a las medidas efectivas.

En resumidas cuentas, desde el punto de vista de una ecuación, lo mismo da la percepción que un agente tenga acerca de la verdad o falsedad de una ley. Lo importante, desde el punto de vista metodológico que defiendo, es *si se utiliza o no*, es decir, *si interviene en alguna de las premisas del modelo*. Desde el momento en que se la considera verdadera, y, junto a otras premisas que hacen referencia a contornos o condiciones iniciales, se obtienen conclusiones que pueden comprobarse empíricamente, afirmo que *no hay diferencia entre considerarla una ley o un instrumento*. Desde el punto de vista metodológico da exactamente lo mismo. Lo que cuenta es que se utilice en un argumen-

VIII. EL INSTRUMENTALISMO DE LOS MODELOS TEÓRICOS

to, tal y como ha venido utilizándose con normalidad, y tal como se utilizará en un futuro, hasta que surjan problemas de adecuación. En este caso, no resultará falsada inmediatamente, desde luego, y se tardará más en falsar cuanto mayor sea el grado de generalidad y abstracción que la ley contenga; es decir, cuanto mayor sea su alcance.

8.2. Verdad y éxito empírico

Una vez que he defendido la equivalencia metodológica que existe a la hora de hablar de teorías como instrumentos y teorías como conjunto de enunciados considerados verdaderos, creo haber salvado uno de los escollos principales para alcanzar una síntesis básica entre lo que ambas posturas defienden. Sin embargo, debemos seguir avanzando en el estudio del instrumentalismo, puesto que quedan pendientes algunas cuestiones muy importantes, como la subdeterminación empírica, el papel de los llamados “límites clásicos” entre teorías, o el hipotético apoyo de la Física contemporánea al instrumentalismo. Para tratar estas cuestiones pasaré ahora a resumir las razones que llevan a Andrés Rivadulla (2004, fundamentalmente) y a Giovanni Boniolo (2002, 2004) a decantarse por una concepción instrumentalista de las teorías científicas. Con ayuda de sus análisis, podremos seguir avanzando y sacando consecuencias que apoyen las directrices fundamentales de esta tesis doctoral.

Así, para Andrés Rivadulla (2004, p. 17), la ciencia es fundamentalmente teórica. Esto significa que la naturaleza suministra una serie de datos que los científicos interpretan de acuerdo con unos principios teóricos. El realismo científico considera que estas proposiciones son verdaderas, y que los modelos se corresponden con la realidad de las cosas. Las teorías describirían, predecirían y explicarían, y nos dirían cómo es en sí la realidad objetiva de las cosas, con independencia del observador que recoge y analiza los datos experimentales. Tras esta postura epistemológica se encontraría la teoría de la correspondencia de Aristóteles, según la cual una proposición es verdadera si concuerda con la realidad, si se adecua a los hechos.

Sin embargo, la aceptabilidad empírica de las teorías, su éxito a la hora de predecir, no debe considerarse, según Rivadulla (2004, pp. 14, 181), un indicador de su verdad. Nuestras teorías son formas de manejarnos con la realidad, instrumentos de cálculo

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

que permiten esquematizar y simplificar la naturaleza, con el fin de adaptarnos al mundo que nos rodea, sin que ello signifique que la ciencia descubra las causas últimas de su comportamiento: los modelos no son una imagen o reflejo de algo real, sino algo esencialmente construido por nosotros y para nosotros: la utilidad, no la verdad, es el criterio que guía la empresa y el progreso científico.

En resumen, las razones por las que Rivadulla defiende una posición instrumentalista son las siguientes:

1) *La subdeterminación empírica*. La existencia de varias teorías incompatibles entre sí, pero empíricamente equivalentes, es un hecho fundamental de la ciencia desde sus inicios. El criterio de simplicidad, mediante el cual el científico escoge, de entre todas las hipótesis, aquellas que sin perder poder predictivo resulten las más sencillas, se sitúa por fuera del criterio de aceptabilidad empírica: las apariencias pueden salvarse mediante hipótesis diferentes; una explicación no tiene por qué ser verdadera, ni la única, pues existen multitud de métodos diferentes, algunos de los cuales todavía podemos no conocer.

2) *El rechazo de la inducción como inferencia demostrativa, como justificación de la probabilidad de verdad, o como teoría de la credibilidad*. Del hecho de que normalmente aprendamos de la experiencia, esto es, por generalización de casos, no se sigue que el método inductivo pueda justificar o demostrar la validez de una ley. Los éxitos que una generalización puede suministrar bien podrían ser inferidos a partir de otra, sobre todo cuando los instrumentos de recogida de datos se hacen más precisos y muestran las carencias de determinadas generalizaciones que hasta entonces se habían tenido por verdaderas. A la teoría, como conjunto limitado de axiomas, no se llega mediante un proceso inductivo, análogo al de catalogación de los datos, sino que muchas veces interviene la intuición, las consideraciones matemáticas, o el tanteo deductivo. Más aún, Rivadulla (2004, pp. 48-59) niega, contra Howson y Urbach (1993), que la creencia en la verdad de una hipótesis aumente o disminuya por las evidencias disponibles.

3) *El balance predictivo*, como procedimiento fundamental que permite la *comparación racional* de teorías en competencia. En este sentido, Rivadulla (*op. cit.*, p. 29) afirma:

La teoría que mejor parada sale de la comparación de sus capacidades predictivas -observacional y/o experimentalmente contrastadas- será la que consideraremos la más aceptable empíricamente, y por

VIII. EL INSTRUMENTALISMO DE LOS MODELOS TEÓRICOS

tanto, *la que aceptaremos, provisional y pasajeramente, como forma de salvar los fenómenos, sin que ello implique ningún compromiso con, o ninguna creencia acerca de, su verdad.*

Las refutaciones (*op. cit.*, p. 95) se presentan porque los nuevos descubrimientos no se adecuan a la teoría en vigor, o porque existe una incompatibilidad entre dos teorías, una de las cuales predice resultados que la otra teoría es incapaz de explicar. Rivadulla (*ibid.*, p. 102-103) considera que el instrumentalismo no es contradictorio con la existencia de las refutaciones empíricas, si bien prefiere usar la palabra “rechazo” en vez de refutación. Rechazar una teoría significaría entonces reconocer que el marco conceptual teórico ha dejado de ser eficiente en nuestro trato con la naturaleza.

4) La existencia de *casos límites* entre teorías, de manera que, por ejemplo, particularizando las leyes de la Teoría General de la Relatividad para velocidades próximas a la de la velocidad de la luz y en campos gravitatorios débiles, se obtuvieran las ecuaciones de la Mecánica Clásica; igualmente, a partir de la Mecánica Cuántica, las leyes clásicas de la Mecánica se recuperarían cuando la constante de Planck se hiciera lo suficientemente pequeña. Rivadulla apoya la opinión de Popper (1971, § 79) de que las teorías superadas siguen siendo de aplicación como aproximaciones en determinados dominios. La teoría de Einstein es de mayor alcance que la de Newton, de manera que todo éxito anterior de la teoría superada se convierte en un nuevo éxito de la teoría más comprensiva. A pesar de que la racionalidad del cambio científico se seguiría conservando, según Rivadulla (*op. cit.*, p. 109) la cuestión fundamental ya no residiría en cuál de las teorías estuviera más cerca de la verdad, sino en cuál es derivable matemáticamente a partir de la otra.

5) Paralelamente al punto 4) anterior, Rivadulla considera la metodología de la Física exige que el vocabulario de las teorías sea *homólogo*, es decir, que sea posible la *comparabilidad*, algo que a su juicio viene garantizado por el *análisis dimensional*. De esta manera, se pueden comparar, por ejemplo, las componentes de las magnitudes vectoriales relativistas con las correspondientes de la mecánica clásica. A pesar de que las teorías clásica y relativista sean *incompatibles* entre sí, y de este modo resulten *intraducibles*, ya que, por ejemplo, el espacio-tiempo cuadrimensional confiere a la Relatividad un carácter pseudoeuclídeo, mientras que la Mecánica Clásica adopta un punto de vista euclídeo, eso no impide que los términos sean homólogos, aunque se trate de cosmovisiones geoméricamente incompatibles entre sí.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

6) *La superdeterminación de la Física por la Matemática*, es decir, el hecho de que no toda la Matemática disponible tenga una interpretación física, sugiere que la Matemática, más que ser el lenguaje en el que está escrito la naturaleza, es una herramienta eficaz con la que modelizamos científicamente la realidad, sin que todos sus elementos tengan que encontrar un correlato físico.

7) Las *explicaciones teóricas* que utiliza la Física consisten en derivar matemáticamente el *explanandum* a partir de una ley o teoría que hace las funciones de *explanans*. Este tipo de explicación, que incluye no sólo hechos, sino leyes e incluso teorías, no supone ningún compromiso metafísico con las causas reales que penetrarían en el conocimiento de la materia, sino que insisten en la importancia de las herramientas matemáticas que permiten concluir a partir de una serie de premisas lo que ha de ser explicado. Explicar, entonces, es derivar matemáticamente, y Rivadulla (*op. cit.*, pp. 70-87) amplía el *explanandum* a todas las estructuras de la Física, no sólo a hechos y leyes empíricas. La explicación no sólo atendería a 1) *hechos de experiencia*, como la retrogradación de los planetas, el movimiento browniano, la radioactividad, el efecto fotoeléctrico, las líneas espectrales, o el experimento de Michelson-Morley, sino que incluiría 2) *fórmulas empíricas*, como las leyes de Kepler de los movimientos planetarios, la ley de caída libre de los cuerpos de Galileo, ley de Boyle, ley de Stefan de la radiación del cuerpo negro, etc, 3) *leyes o hipótesis de diferente nivel de generalidad*, como la ley del desplazamiento de Wien, las ecuaciones de Maxwell, o las leyes de distribución de Boltzmann, y 4) las mismas *teorías* de la Física, como la deducción cuántico-estadística de la Ley de radiación de Planck, o la reducción estadística de la termodinámica clásica.

8) Rivadulla, después de preguntarse (*op. cit.*, p. 28) por la compatibilidad de la Física actual con las metodologías realista o instrumentalista, opina que la Mecánica Cuántica ofrece argumentos a favor del instrumentalismo, pues, por ejemplo, no permite una interpretación realista de las funciones de onda, soluciones de la ecuación diferencial compleja de Schrödinger, al tratarse de magnitudes complejas que no pueden medirse por ningún instrumento real. Con Eisberg y Resnick (2000, p. 169) afirma que las funciones de onda son *dispositivos computacionales* que tienen sentido dentro de la teoría general, y que sólo constituirían por tanto instrumentos útiles para el cálculo y la predicción.

Por otra parte, y dentro del debate entre la interpretación de Copenhague, que no atribuye una medida objetiva a una magnitud antes de ser medida, y la interpretación

VIII. EL INSTRUMENTALISMO DE LOS MODELOS TEÓRICOS

realista-determinista de De Broglie, los resultados experimentales desarrollados, entre otros, por Alain Aspect, parecen inclinarse por la completud de la Teoría Cuántica, frente a la existencia de supuestas variables ocultas que complementarían el carácter estadístico de la Mecánica Cuántica hacia una representación causal y determinista de los fenómenos microscópicos.

Rivadulla (*op. cit.*, Cap. V, pp. 135-152) también considera el papel que los modelos teóricos desempeñan en determinados campos de la Física, cuando, a falta de una teoría capaz de sistematizar la información empírica disponible, los científicos recurren a ciertas hipótesis que esquematizan los fenómenos de forma parcial, esquemática e incompleta. El modelo teórico resultante sería una teoría con un campo de actuación muy limitado, en un dominio muy específico de fenómenos. Se trata de conceptualizar matemáticamente determinadas relaciones físicas, dentro del proceso general de idealización de la naturaleza, sin que ello signifique que estos modelos representan fielmente la realidad.

Las imágenes pictóricas de la realidad son ilusorias [...] Nosotros no podemos saber que estamos pintando o describiendo una porción de realidad [...] En particular no hacemos esto en Física, donde sólo disponemos de algunas apariencias -normalmente ininteligibles al principio- por medio de las que se manifiestan los fenómenos. Cuando en ocasiones logramos construir modelos teóricos para tales fenómenos solemos decir que éstos son empíricamente aceptables. Pero no hay ninguna razón para afirmar que simulan o representan la realidad. La inferencia del éxito empírico a la verdad es lógicamente ilegítima.

De la existencia de estos modelos *incompatibles* entre sí, puesto que parten de hipótesis contrarias (el modelo de capas permitiría el movimiento libre de los nucleones, mientras que el modelo de gota lo prohibiría), Rivadulla deduce que ambos modelos sólo tratan de dar cuenta de un número *limitado* de fenómenos, sin tener en cuenta las hipótesis que los contradicen, y con el único propósito de salvar las apariencias. Ninguno de los dos modelos vale para el conjunto del núcleo, y subdeterminan empíricamente la Física Nuclear, de lo que se deduce que los modelos no son verdaderos, ni más o menos verosímiles.

Por todas estas razones, Rivadulla piensa la ciencia debe abandonar la búsqueda de la verdad, ya que, entre otras cosas, nunca podría estar segura de haberla alcanzado. El éxito y el fracaso, que sí conocemos, son los criterios en los que realmente se basa el conocimiento científico, por lo que el progreso científico no es un avance hacia la ver-

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

dad, sino hacia el *éxito* con nuestras predicciones. El salto de los hechos a la teoría, hacia la explicación, posibilita la existencia de marcos teóricos incompatibles entre sí, de los que nunca podríamos discernir cuáles son los verdaderos y cuáles los falsos. Las teorías de la Física no pretenden ser modelos de la realidad, por lo que la Filosofía de la Ciencia debe abandonar cualquier lenguaje realista, representacional, descriptivo, pictórico, isomórfico o analógico. En resumen (*op. cit.*, p. 144):

Resulta obvio que el éxito empírico nada tiene que ver con la verdad; en particular, que no constituye ningún indicador de verosimilitud ni de probabilidad de verdad. Relaciones más débiles como similitud o analogía tampoco parecen justificadas. Y por supuesto, menos aún, isomorfismo entre modelo y realidad.

8.3. Subdeterminación empírica y casos límites

Coincido con Rivadulla en que los modelos no son indicadores de ninguna probabilidad de verdad; tampoco son copias, ni simulaciones, ni analogías del mundo. También acepto el papel de las explicaciones teóricas, como deducción a partir de un *explanans*, así como la importancia del análisis dimensional como herramienta que posibilita el balance predictivo. Sin embargo, la relación entre la representación y la realidad es de *síntesis*, en el sentido de constituir algo más que un mero resumen de datos. A continuación, expondré mi crítica sobre los temas de la subdeterminación empírica, los límites clásicos y la superdeterminación matemática.

1) Respecto al problema de la *subdeterminación empírica*, creo haber dado suficientes ejemplos en los capítulos I, II, V y VII que demuestran que un mismo fenómeno puede ser modelado de diferentes maneras sin que en ningún momento se pierda parte de su información física. En Teoría de Circuitos, en Resistencia de Materiales, en Mecánica, en Magnetismo, y, en general, en el Cálculo Vectorial, se enseña cómo pueden obtenerse sistemas equivalentes que simplifican las ecuaciones y que, en esencia, son el mismo fenómeno. Se utiliza, de entre todos ellos, efectivamente, el más útil, dependiendo del problema en particular y de la naturaleza del fenómeno. Pero estos sistemas son todos compatibles entre sí; designan el mismo fenómeno, pero representado de distinta manera. Un cambio en los ejes de referencia, por ejemplo, aunque cambie la estructura

VIII. EL INSTRUMENTALISMO DE LOS MODELOS TEÓRICOS

extensional de la realidad, de manera que dejan de conservarse los objetos y las propiedades, en contra de todo isomorfismo, no por ello deja de referirse al mismo fenómeno y conservar su “esencia”. Más aún, no sólo no resultan incompatibles, sino que todos se completan y relacionan entre sí a través de fórmulas matemáticas que permiten ir desde un sistema a otro avanzando hacia la resolución del problema, hasta que al fin queda resuelto en uno de ellos, donde se despeja la incógnita que interesa. Por eso he dicho que todas estas representaciones responden en realidad a una misma síntesis, aunque expresada de diferentes formas, todas ellas, como digo, compatibles y complementarias. En estos casos, primeros candidatos a la subdeterminación empírica, no hay ningún problema en utilizar todos los sistemas a la vez, puesto que son equivalentes y expresan la misma síntesis. En realidad, no serían formas alternativas en el sentido fuerte del término, esto es, maneras distintas de reconstruir una misma realidad: todos parten de las mismas leyes, aunque modificadas para cada sistema. No hay incompatibilidad, por tanto, y no existe subdeterminación.

Un segundo caso es el de teorías fuertemente incompatibles entre sí que compiten por ofrecer un modelo acerca del mismo fenómeno. Ambas teorías se pronuncian sobre el fenómeno, y parten de principios contradictorios entre sí para la resolución del problema. Como yo defiendo que el fundamento de un modelo son las leyes que se utilizan como enunciados teóricos, tengo que admitir, frente a Cartwright, que *la incompatibilidad es inmediata*, porque afecta a las premisas del modelo. Las teorías se distinguen entre sí por los diferentes modos de relacionar las mismas dimensiones físicas, y por el rango que pueden tomar estas propiedades. Es decir, las teorías admiten y prohíben estados de cosas distintos, y es ahí donde se ve las diferencias entre ellas, sobre todo a la hora de predecir sus consecuencias. En ocasiones, los resultados de las distintas teorías difieren entre sí y puede efectuarse una comparación absolutamente racional entre ellos. La teoría ondulatoria de Young era capaz de explicar los fenómenos de interferencia que no explicaba la teoría corpuscular. La teoría de los fotones de Einstein predecía y “salvaba las apariencias” de fenómenos como el fotoeléctrico, de Compton, o la producción de pares, lo que sugirió una síntesis entre ambas teorías ondulatoria y corpuscular. La Mecánica Clásica fallaba a la hora de explicar estos aspectos complementarios de la materia, como la interferencia y la difracción; tampoco daba cuenta de la radiación de un cuerpo en las altas frecuencias, lo que se conoce como “catástrofe ultravioleta”, ni del fenómeno de la emisión de rayos X, donde se demuestra experimentalmente la exis-

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

tencia de una longitud de onda mínima, por no hablar de fenómenos cuánticos relativistas, como la producción de pares. En estos casos, el *balance predictivo* nos asegura la decisión en favor de una teoría u otra, porque no hay más que observar la diferencia entre los errores que se cometen. La decisión racional, aquí, es una cuestión empírica, donde son los hechos y los resultados experimentales los que deciden. Tampoco habría subdeterminación.

Pero fijémonos ahora en los casos donde hay una igualdad predictiva, es decir, donde teorías incompatibles, que parten de principios y leyes diferentes, son capaces de ajustarse a las apariencias de la misma forma. Aquí, en principio, no parece aplicable el balance predictivo, y los científicos podrían tener la libertad de escoger el modelo que más les “gustara”, pues la “adecuación empírica” sería la misma. Por ejemplo, aunque la fórmula de Rayleigh-Jeans para la radiación de un cuerpo negro, construida a partir de la ley de equipartición de la energía, no funcione para altas frecuencias, sí sería empíricamente válida para las bajas, donde conseguiría supuestamente los mismos resultados que la fórmula de Planck. También puede sospecharse que las ecuaciones de Lorentz y Fitzgerald son las mismas que las de Einstein, por lo que no existen diferencias empíricas entre ambas, ya que ambas son capaces de predecir la contracción de la longitud del cuerpo y la dilatación del tiempo, frente a los principios de relatividad del movimiento de Galileo. El balance predictivo del modelo de Bohr frente a la Mecánica Clásica constituiría también una forma de criterio racional, empírico. Pero, ¿cómo escoger entre la Mecánica Cuántica, y el modelo de Bohr? ¿No son ambas teorías capaces de predecir las series de Lyman, Brackett y Pfund, de trabajar para átomos con $Z = 2$, y de entender, en general, las propiedades del espectro de absorción de los átomos monoeléctricos? Además, ambos modelos de realidad predicen los valores de las energías permitidas dentro del sistema. En general, toda la teoría cuántica antigua se desmarcaba de la Mecánica Clásica, y predecía fenómenos como sistemas periódicos, o las capacidades caloríficas de los sólidos a bajas temperaturas. Cuando no interviene la posibilidad racional de que los hechos hablen por sí solos, a igualdad de eficiencia empírica, ¿son otros los criterios que ayudan a decidir las teorías? ¿La “simplicidad”? ¿Se podría hablar incluso del “acuerdo social” para la elección de teorías que “subdeterminan” la realidad?

Ahora bien: ¿por qué quedarnos en ese alcance particular y no ir más allá? ¿Qué nos impide probar el éxito de las fórmulas *más allá* de un determinado dominio y para una serie específica de valores? En el momento en que un modelo “salva las aparien-

VIII. EL INSTRUMENTALISMO DE LOS MODELOS TEÓRICOS

cias”, ¿queda prohibido por decreto tratar de explicarlo con otro modelo que también funcione para casos más amplios? ¿Por qué seguir estableciendo una división arbitraria entre “adecuación empírica” y “teoría”? Este error parte de Duhem, quien dice que la teoría tiene “implicaciones ontológicas”, aunque nadie sepa muy bien dónde están. Los defensores de la subdeterminación se detienen en un alcance a partir del cual “nada ven” y nada les interesa. Porque, la fórmula de Planck, ¿no permite derivar la fórmula de Rayleigh-Jeans, la ley de Stefan y la ley del desplazamiento de Wien? ¿O es que “sólo” las resume? El modelo de Bohr puede “subdeterminar” empíricamente *casos muy aislados*, pero no explicaba, por ejemplo, las funciones de densidad de probabilidad, violaba el principio de indeterminación, no predecía los momentos angulares orbitales, ni el espín electrónico, ni otros efectos relativistas. *Y cuando digo “no explicaba” quiero decir “no salvaba las apariencias”, es decir, que los resultados eran catastróficos empíricamente.* ¿Dónde está aquí la igualdad de eficiencia empírica? Porque *en el momento que ampliamos el alcance, la subdeterminación desaparece.* ¿O es que ampliar el alcance es un ejercicio metafísico, como si las cantidades dinámicas que intervinieran hubieran sufrido alguna especie de percance y hubieran dejado de referirse a las mismas cosas?

Aunque la teoría cuántica antigua resolviera algunos problemas muy importantes, claves en ese desarrollo portentoso de la Física del siglo pasado, ¿debemos de conformarnos para siempre con el modelo de Sommerfeld? Porque los modelos anteriores a la ecuación de Schrödinger funcionaban con algunos sistemas periódicos, pero ni siquiera con todos: las reglas de cuantización de Wilson-Sommerfeld sólo funcionaban en ocasiones, y excluían los sistemas no periódicos. Aunque la teoría era relativamente válida para átomos monoeléctricos, *su éxito se detenía* para el átomo neutro de Helio, y no permitía calcular las velocidades de transición entre los estados permitidos²²⁹. Por el contrario, la teoría de Schrödinger, *además* de predecir los valores de la energía del sistema, las frecuencias de los fotones, y las propiedades fundamentales de los átomos de un solo electrón, era capaz de ir más allá y predecir las probabilidades por segundo de que una transición ocurra, la penetración de la región clásicamente excluida, o los fenómenos de tunelamiento. Y todavía más: explicaba problemas para los que todavía no existía ninguna solución, como la emisión de partículas alfa en el decaimiento de nú-

²²⁹ Cf. Eisberg & Resnik (2000, p. 151)

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

cleos radiactivos. ¿Dónde está aquí la “subdeterminación”? ¿Dónde está aquí el “resumen” de las leyes fenomenológicas o la “capacidad organizativa” de la teoría?

Por ejemplo, en Eisberg y Resnik (2000, p. 289), se afirma:

Ahora se puede saber mucho más acerca del átomo con un electrón de lo que es posible obtener del modelo de Bohr, ya que se tienen las eigenfunciones además de los eigenvalores. Las eigenfunciones poseen una gran cantidad de información adicional acerca de las propiedades del átomo.

¿No hay diferencia “empírica” entre tener los eigenvalores y tener las eigenfunciones? ¿No hay diferencia “empírica” entre considerar la transición cuántica como un cambio de energía entre un modo vibracional y otro, a considerarla como un “salto de electrones”? ¿Cómo se podrían haber ampliado las ecuaciones de Lorentz y haber conseguido los principios de la Relatividad de Einstein si la contracción del objeto resultara ser “real” y se debiera a la existencia material de un éter a través del cual los cuerpos se mueven? Porque las ecuaciones de Lorentz *no* son las mismas que las de Einstein, por mucho que se parezcan: en el caso de Lorentz la velocidad v es la velocidad del objeto con respecto al éter, mientras que en Einstein v es la velocidad del objeto respecto del observador. La velocidad, en este último caso, es una medida directa, y se deduce de la invariancia de la velocidad de la luz, que actúa como premisa fundamental a partir de la cual se derivan las ecuaciones. Este principio es trasladable con éxito a otros campos diferentes, mientras que las correcciones de Lorentz tienen su ámbito muy específico a partir del cual dejan de ser válidas; esto es, dejan de ser “adecuadas empíricamente”.

Todos estos modelos son válidos en un ámbito muy limitado, y no pueden constituirse en referentes últimos de la modelización científica, que tiene un significado mucho mayor que el de la aplicación de microteorías. Un modelo más general del Electromagnetismo Cuántico, a través de la Mecánica Matricial de Heisenberg, por ejemplo, está mucho más ajustado al proceso real de la modelización que un modelo de bolas de billar. La razón es que *su síntesis física es mucho más amplia y precisa* que los modelos de bajo nivel, cuya función es proporcionar pistas hasta la llegada de una teoría más comprensiva que derive los modelos anteriores y explique por qué tenían éxito.

Porque sólo a raíz de que haya una teoría con principios firmes puede entonces decirse que el fallo de los modelos de Sommerfeld, por ejemplo, era que utilizaba la Mecánica Clásica para evaluar estadísticamente la energía, y eso le impedía tener en

VIII. EL INSTRUMENTALISMO DE LOS MODELOS TEÓRICOS

cuenta la interacción espín-órbita y la dependencia relativista de la masa con la velocidad²³⁰. De hecho, aunque se corrigiera relativísticamente el modelo de Sommerfeld, no se podría explicar ni el corrimiento Lamb ni los desdoblamientos hiperfinos, por ejemplo.

Hay que ampliar el alcance de estos modelos y ver dónde fallan y por qué. Y para eso se requiere un procedimiento más general que es el que proporciona la teoría. Como los departamentos de la Física no son compartimentos estancos, la comparación entre los modelos, el balance predictivo, no puede quedarse en un ámbito eterno, sino que tiene que viajar y *dar la cara* en otros dominios, donde las cantidades físicas en juego son las mismas.

Por último, quiero terminar esta crítica de la “subdeterminación” oponiéndome a la existencia de supuestos “reinos ontológicos” donde unas ecuaciones aparecerían y desaparecerían milagrosamente, sin mezclarse, dispuestas a “salvar las apariencias”. Esto es, quiero oponerme a la existencia de “límites clásicos” donde la verdad de leyes que ya se han demostrado falsas, es decir, no suficientemente precisas, volverían a ser “verdaderas”, como las leyes de Newton a la hora de “tirar cohetes”. De momento, sólo quiero indicar lo siguiente: aunque a nosotros nos parezca que un péndulo funciona por las leyes clásicas, y no podamos “observar” las perturbaciones “microfísicas” del sistema, no por eso la energía va a dejar de estar cuantificada, o la constante de Planck va a desaparecer, y se va a hacer “cero”. Lo real, el comienzo de la representación, es la medida. Pero esa medida también tiene que viajar y precisarse todo lo que se pueda. *Los enunciados de observación que se consideran verdaderos (como el cálculo de ciertas constantes) son válidos para toda la ciencia y no tienen por qué quedar delimitados a unos cuantos fenómenos.* Y si hay un límite para la precisión a la hora de medir la cantidad de movimiento y la posición, o de la energía y el tiempo, por muy pequeño que sea ese límite, lo hay en todas partes, si es que se cumplen las condiciones del antecedente. Porque estas condiciones no hacen referencia en ningún momento a la división del Universo según el orden de magnitud.

²³⁰ Sin embargo, Rivadulla (2004, pp. 114-120), a partir de una idea de Taylor y Wheeler (1992), concluye del análisis del módulo de la cuadrantidad del movimiento de una partícula que la masa es independiente de su velocidad, y resulta ser la misma en reposo o en movimiento respecto de un observador inercial dado.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Concluyo, pues, diciendo que *la “subdeterminación” desaparece al ampliar el alcance o al aumentar la precisión de las medidas.*

2) Respecto de los llamados “*límites clásicos*”, y aunque la historia nos ofrece muchos ejemplos de reducciones donde las leyes y teorías se ven incorporadas a otras, creo que esta llamada *reducción lógico-matemática* confunde gravemente lo que es una mera aproximación de lo que es la noción matemática de límite.

Por ejemplo, en Landau y Lifshitz (1992, p. 3), se dice:

El paso de la mecánica relativista a la clásica se puede conseguir formalmente determinando el límite para $c \rightarrow \infty$ de las fórmulas de la mecánica clásica.

También Weyl (1965, p. 211) se expresa en términos idénticos:

Vemos aparecer una nueva física cuántica de la cual las viejas leyes clásicas son un caso límite, en el mismo sentido que la mecánica relativista de Einstein se convierte en la mecánica de Newton cuando c , la velocidad de la luz, tiende a ∞ .

Para Wigner (1967, p. 20)²³¹:

Toda ecuación válida en la teoría cuántica, para cualquier valor de la constante de Planck h , es también válida en el límite $h = 0$.

Llegados a este punto, quiero indicar lo asombroso que me parece que una constante “tienda” a otra cosa que no sea el propio valor que tiene esa constante. Es decir, que ni c , ni h , tienden a nada que no sea lo indicado por su valor. En otras palabras, no son variables; no es posible desarrollar Taylor, ni un límite, ni hacerlos “tender”, porque lo que aquí está en juego no es ninguna variable, sino precisamente una serie de constantes fundamentales que en ningún momento desaparecen milagrosamente para volver a aparecer en otras regiones.

Una cosa es que la velocidad de un móvil sea pequeña en comparación con la velocidad de la luz, y otra cosa es que la velocidad de la luz tienda a ser infinito. Igual-

²³¹ Citado en Rivadulla (2004, p. 106)

VIII. EL INSTRUMENTALISMO DE LOS MODELOS TEÓRICOS

mente, si un científico hace la constante de Planck $h \approx 0$ porque le interesa para simplificar los cálculos y porque en el orden de magnitud en que se mueve sus efectos son minúsculos, no por eso la h va a desaparecer, se va a hacer “0”, o va a tender a hacerse “0”. Decir esto es no haber comprendido la naturaleza física de estas constantes. Por poner un ejemplo, sería como decir que cuando se toma la Tierra como una esfera es porque la Tierra tiende a ser una esfera. La Tierra no tiende a ser esférica: es como es, pero para una primera aproximación el error que se comete es pequeño. De igual modo, que un ingeniero diseñe y construya un automóvil con las leyes de Newton, no significa ni que c se ha hecho infinito, ni que la velocidad partida por c va a ser “0”. No se trata de ser excesivamente rigurosos, sino de no cometer un error que hace que retrocedamos a la Física del siglo XIX cada vez que afirmamos semejantes cosas.

Los llamados “límites de correspondencia”, “reglas de correspondencia”, o “límites matemáticos”, no constituyen, desde un punto de vista físico, absolutamente nada: sólo tienen que ver con efectos *prácticos*, no matemáticos, ni mucho menos lógicos. Las derivaciones matemáticas no existen, por la sencilla razón de que *las constantes no desaparecen*. La masa del electrón, del neutrón, del protón, el número de Avogadro, la constante de los gases ideales, la constante de Faraday, la carga del electrón, *no tienden a otra cosa que no sea a su número*, porque para eso son constantes, aunque no conozcamos todas las cifras que arrastran en sus decimales.

Desde el momento que un móvil tiene una velocidad uniforme, por ejemplo, de 1 m/s, su velocidad no tiende nunca a ser cero. v , en este caso, es mucho menor que c , lo que se indica diciendo que $v \ll c$, y que por tanto v/c es *aproximadamente* cero. Pero hacer que $c \rightarrow \infty$ es uno de los errores más graves que cabe imaginar en un físico, porque se deja de indicar, precisamente, la invariancia de la velocidad de la luz en todas las direcciones. Porque “invariancia” significa eso mismo: que es una constante, que no puede tender a nada, y que vale, en el vacío, $2,998 \times 10^8$ m/s.

Como ya indiqué en el Cap. III, § 3.1., no es lo mismo el símbolo “ \approx ” que el símbolo “ \rightarrow ”. En el primer caso se trata de una aproximación *más o menos justificada* para aplicaciones prácticas; en el segundo caso se trata de un concepto matemático de teoría de sucesiones y funciones que no tiene *absolutamente nada* que ver con el primero. Si yo escribo:

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

no puedo hacer $\frac{v}{c} \rightarrow 0$, sino $\frac{v}{c} \approx 0$, lo que tiene un significado completamente distinto.

Y lo mismo para la energía, la fuerza, o el momento relativistas: los equivalentes de la mecánica clásica no se obtienen mediante límites matemáticos, desarrollando Taylor, sino por aproximaciones, como indica Einstein (1994, p. 90):

Si se particularizan las ecuaciones de la teoría general de la relatividad al caso de que los campos gravitatorios sean débiles y de que todas las masas se muevan respecto al sistema de coordenadas con velocidades pequeñas comparadas con la de la luz, entonces se obtiene la teoría de Newton como primera aproximación.

Pero, “primera aproximación”, no significa “límite matemático”. *El mundo no se forma de episodios físicos*, no se divide en ontologías según la teoría dominante, de forma que las leyes desaparecen en el paso de unas a otras, para volver a surgir más adelante. *Las constantes siempre están presentes, otra cosa es que no se perciban sus efectos*. La Teoría de la Relatividad no tiene “su dominio” en los grandes campos gravitatorios del Universo, y cuando llega a la Tierra se detiene para dar paso a las leyes de Newton hasta que en el mundo atómico reaparece en las ecuaciones de Dirac. No: siempre están, eso es una ley, aunque luego se demuestre que no era tan verdadera como se pensaba, y surja una teoría de la cual sea sólo una aproximación.

Pero, además, hay una gran diferencia entre reducir estadísticamente la termodinámica clásica como hace Boltzman, donde no se comete ningún error físico, como no sea suponer que hay algo así como moléculas y átomos, elementos físicos mínimos a partir de los cuales reconstruir macroscópicamente la realidad de un fluido, y pretender reducir la estadística cuántica a la estadística clásica cometiendo una serie de errores de naturaleza física al suponer que la constante de Plank se va a convertir en cero en algún momento “haciéndola tender matemáticamente”.

Lo increíble, como digo, es que estos errores lo cometan físicos que incluso han sido galardonados con el premio Nobel, como Willis Lamb quien, siguiendo a Messiah, deriva “matemáticamente” el límite clásico haciendo $\hbar \rightarrow 0$ en la ecuación de Hamilton-Jacobi, y todo para demostrar que las teorías cuántica y clásica forman la “mecánica

VIII. EL INSTRUMENTALISMO DE LOS MODELOS TEÓRICOS

cuántica super clásica”²³². Messiah (1983, p. 197) alude al “principio de correspondencia” de Bohr, para insistir nuevamente:

En el límite cuando $\hbar \rightarrow 0$, las leyes de la Mecánica Cuántica deben reducirse a las de la Mecánica Clásica. El principio de correspondencia [...] tenía precisamente como objeto responder a esta exigencia fundamental.

La Mecánica Clásica debe, por tanto, suministrar una buena descripción de los fenómenos en todos los casos en que el cuanto de acción pueda considerarse como infinitamente pequeño.

¿Cómo va a considerarse h “infinitamente pequeño”? ¿Pero no vale 6.626×10^{-34} J s.? ¿No se ha comprobado experimentalmente, una y otra vez, su valor?²³³ La constante de Planck puede considerarse sin efecto, y por aproximación, para ciertos niveles, igual a cero. Pero con ello estamos cometiendo un error teórico: *estamos haciendo desaparecer la Mecánica Cuántica, no estamos derivando nada a partir de ella*; sencillamente, volvemos, como he dicho, a la Física del siglo XIX.

Así que tampoco se puede derivar “matemáticamente” la segunda ley de Newton a partir de la función Ψ , ni siquiera haciendo los números cuánticos grandes. Los números cuánticos, que definen el sistema, serán los que sean en cada caso; no podemos aumentar su valor hasta hacer desaparecer la teoría y decir que hemos reducido una teoría a otra. Si hacemos desaparecer la constante de Plank, claro que obtenemos la Dinámica de Newton. Si la velocidad de la luz no es una constante, y puede tender a infinito, desde luego que obtenemos la teoría de Newton. *Pero se trata de lo contrario*: de que un móvil no puede alcanzar esa velocidad, de que hay un límite físico, de que alguien ha sido capaz de descubrirlo y demostrarlo. ¡Sin la constante de Plank se puede medir al mismo tiempo, sin ninguna indeterminación, la cantidad de movimiento y la posición, la energía y el tiempo! ¿Hemos reducido una teoría a otra? ¿Hemos alcanzado un límite clásico? ¿O más bien hemos negado la Teoría Cuántica?

Repitámoslo, una vez más: no hay límites matemáticos entre estas teorías, por la sencilla razón de que las constantes no varían, y por eso se llaman constantes. Aunque el papel lo aguante todo, y puedan eliminarse en una ecuación todos los factores que se quieran, hay que justificar por qué se anula un término, por qué desaparece, y cuál es el

²³² Lamb (2001, p. 25)

²³³ Medida que se puede efectuar por diferentes procedimientos: a partir de c , λ mínima, efecto Compton, efecto fotoeléctrico, o rayos X. (Siempre mediante teoría, desde luego).

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

error que se comete. El cálculo predictivo podría resultar muy inexacto, según los órdenes de magnitud donde nos moviéramos.

3) Respecto del *papel de la Matemática* a la hora de esquematizar físicamente el mundo, tengo que remitirme al Capítulo II, sobre modelos de Astronomía, cuando indiqué que la arbitrariedad de las hipótesis matemáticas tiene un límite, y que un modelo en Física tiene que cumplir una serie de condiciones que limitan las soluciones matemáticas del problema. Los modelos de Eudoxo, Ptolomeo o Copérnico establecían por medio de la Geometría las condiciones de continuidad y de diferenciabilidad de las funciones para que su modelo adquiriera el carácter de representación física. No todas las fórmulas matemáticas son válidas para “salvar las apariencias”: la función, de entrada, debe ceñirse a las condiciones físicas que le vienen impuestas *a priori* por el carácter general de la representación.

Otro ejemplo ilustrativo es el problema de encontrar soluciones a la ecuación de Schrödinger independiente del tiempo:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = \frac{2m}{\hbar^2} [V(x) - E]\psi$$

Esta ecuación diferencial tiene muchas soluciones. Pero de entre todas ellas hay que seleccionar aquellas que tengan un significado físico, las que permiten, por ejemplo, obtener la cuantización de la energía. Eisberg y Resnik (2000, pp. 192-193) señalan:

Para que una solución sea aceptable, se requiere que una eigenfunción $\psi(x)$ y su derivada $d\psi(x)/dx$ tengan las siguientes propiedades:

$\psi(x)$ debe ser finita

$d\psi(x)/dx$ debe ser finita

$\psi(x)$ debe ser monovaluada

$d\psi(x)/dx$ debe ser monovaluada

$\psi(x)$ debe ser continua

$d\psi(x)/dx$ debe ser continua

Lo único que aquí se está indicando es que la eigenfunción tiene que ser diferenciable y continua en todos los puntos donde esté definida. Con ello nos aseguramos de

VIII. EL INSTRUMENTALISMO DE LOS MODELOS TEÓRICOS

que las matemáticas calculan cantidades físicas reales, mensurables, e impide que sean computadas funciones con un rango de las variables sin un significado físico.

Otro ejemplo del papel subordinado de la Matemática en Física es el postulado de Max Born de 1926, según el cual existe una relación entre la densidad de probabilidad y la función de onda:

$$P(x, y) = \Psi^*(x, t)\Psi(x, t)$$

$P(x, y) dx$ es la probabilidad de encontrar una partícula entre x y $x + dx$. $\Psi^*(x, t)$ es el complejo conjugado de $\Psi(x, t)$. Pues bien, existen otras combinaciones posibles de $\Psi(x, t)$, funciones reales, como su módulo, $|\Psi(x, t)|$, pero ninguna de ellas tiene un significado físico utilizable²³⁴. De nuevo, *las posibilidades matemáticas son muchas, pero la selección física discrimina*.

Concluyo que, más que hablar de la superdeterminación de la Física por parte de la Matemática, tendríamos que hablar del *papel subordinado* que tiene la Matemática a la hora de construir modelos que representen fenómenos físicos, puesto que no todas las soluciones matemáticas se admiten. Frente a quienes piensan que las teorías físicas contienen elementos “analíticos”, no demostrables, como la Geometría y otras herramientas como el Cálculo Infinitesimal o Matricial, mi tendencia es pensar que en una teoría *nada sobra*, y que las relaciones matemáticas se limitan a expresar relaciones causales entre las dimensiones representadas por símbolos; todas ellos, por supuesto, con un contenido físico.

Porque en Matemática la construcción de objetos sólo está limitada por el principio de no contradicción, mientras que un modelo físico tiene que adecuarse a los hechos, aunque siempre dentro de un margen de error. No es una diferencia pequeña. Por ejemplo, la expresión

$$f(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{g(x + \Delta x) - g(x)}{\Delta x},$$

²³⁴ Cf. Eisberg y Resnik (*op. cit.*, pp. 170-171).

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

tiene un significado estrictamente matemático... hasta que hacemos que $f(x)$ sea la densidad lineal de masa, $g(x)$ la masa, y x la longitud de un hilo. Entonces *la expresión adquiere un significado físico que antes no tenía*. La ecuación puede aplicarse a un hilo material, del que conocemos cómo varía la masa en función de la longitud. La matemática sigue presente (¿cómo podría ser de otra manera?), pero la Física no resulta reducible a ella. Son otras consideraciones las que intervienen.

8.4. Modelos de Física Nuclear

Como Rivadulla, también Boniolo, Petrovich y Pisent (2002, p. 425) constatan que en Física Nuclear no existe una teoría lo suficientemente amplia para organizar en una única estructura la cantidad ingente de datos empíricos que se poseen sobre los fenómenos nucleares. A pesar de que se conocen los componentes del núcleo, así como una buena parte de sus propiedades y relaciones, la Física Nuclear es una colección de modelos contruidos a partir de hipótesis muy diferentes entre sí, y constituye un campo de investigación donde se entrecruzan y alternan principios de muy diferente naturaleza.

En su análisis sobre los fenómenos nucleares, Boniolo *et al.* subrayan que el núcleo atómico es un sistema compacto, de gran densidad y con límites espaciales precisos, compuesto de entidades bien definidas que interactúan mediante fuerzas más o menos conocidas, por lo que el núcleo atómico sería en principio susceptible de una descripción reduccionista. Sin embargo, dado el número de nucleones, que varía desde $A = 1$ para el hidrógeno hasta $A = 238$ para el Uranio, los científicos se enfrentan a un problema parecido al de los n cuerpos, ya que la cantidad de nucleones es demasiado baja para considerarse estadísticamente y demasiado alta para precisar el comportamiento individual de cada uno de ellos.

La consideración que estos autores hacen de la Física Nuclear se basa en la taxonomía de Boniolo (2004), y que hemos visto sucintamente en el Cap. I, § 1.1, donde se establece una distinción entre las teorías, consideradas como representaciones científicas hipotéticas, y los modelos, como representaciones científicas ficticias. Dentro de la clase de modelos que Boniolo señala, la familia de modelos nucleares pertenecería a los *modelos fenomenológicos*, que no guardan ningún tipo de correspondencia con la reali-

VIII. EL INSTRUMENTALISMO DE LOS MODELOS TEÓRICOS

dad, ni consisten por sí solos en una estructura de tipo teórico; solamente son principios *ficticios*, creados para salvar las apariencias.

They might be considered as a sort of spider's web, constructed in order to capture flies, i.e., observable facts that, otherwise, would be without any correlation. In this case, the physicist has neither a representation by means of which he can grasp the facts, nor a model of the principles capable of organizing them. Therefore, he is forced to create, practically from nothing, a model. He borrows mathematical and physical pieces from here and there trying "to put them together" in order to construct something that allows him to correlate the data. (Boniolo, 2004, pp. 77-78).

En estos casos, a falta de las explicaciones profundas que serían proporcionadas por una teoría estricta, el científico realiza tentativas de explicación, redes sintácticas capaces de predecir parcialmente algunos de los fenómenos considerados. La ausencia de leyes fundamentales significa para Boniolo *et al.* que esta rama de la Física, a diferencia de la Teoría de Campos, la Mecánica Clásica o la Teoría General de la Relatividad, no puede ser interpretada de modo realista, al menos en lo que concierne a la estructura teórica, puesto que carece de ella. Toda interpretación realista alcanzaría, como mucho, a las entidades teóricas, pero no al modelo en su conjunto, pues ha sido construido para organizar mediante fórmulas matemáticas un material experimental del que se desconoce la causa real.

Para construir toda esta familia de modelos nucleares, Boniolo *et al.* destacan una serie de hipótesis que ayudan a conectar los datos experimentales y las predicciones. Así, lo que ellos llaman *Basic Theoretical Background* (BTB) no es una teoría, sino un conjunto de enunciados o suposiciones que actúan como punto de referencia común para la totalidad de los modelos. Estas hipótesis pueden dividirse entre a) aquellas que afectan a las propiedades de los objetos, como la identificación de un núcleo X por su número de protones Z, su número de nucleones A, la masa del protón ($m_p = 938,3 \text{ MeV}$), del neutrón ($m_n = 939,6 \text{ MeV}$) y su espín (1/2), y la descomposición de los nucleones en quarks; y b) aquellas que hacen referencia a las propiedades de las interacciones nucleares, como la fuerza electromagnética, la interacción débil y fuerte, la fuerza gravitatoria, así como el rango y la intensidad de estas interacciones.

A partir de BTB, puede entonces construirse la serie de modelos mediante las siguientes aproximaciones (cf., *ibíd.*, p. 433): ignorando la fuerza de gravitación, tratando la fuerza nuclear con independencia de la electromagnética, despreciando la interacción

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

con la nube de electrones, considerando los nucleones como puntos sin dimensiones, sistematizando el núcleo como un problema de n cuerpos sin efectos relativistas, etc. Con estas aproximaciones es posible aplicar la ecuación de Schrödinger para cualquier sistema nuclear:

$$H\Psi(r_1, s_1, \tau_1, \dots, r_A, s_A, \tau_A) = E\Psi(r_1, s_1, \tau_1, \dots, r_A, s_A, \tau_A)$$

donde $H = \sum_{i=1}^A \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla_i^2 + \frac{1}{2} \sum_{j \neq i} V_{ij} \right)$ representa el Hamiltoniano: V_{ij} es el potencial de un nucleón respecto de otro, m la masa del nucleón; Ψ es la función de onda del sistema caracterizada por los vectores de posición r_i , los espines s_i , y los espines isotópicos τ_i ; E representa la energía.²³⁵

Pues bien, aun siendo esta ecuación una simplificación de lo que ocurre en el núcleo, nuevas dificultades se añaden a la hora de intentar resolverla. Ya que el potencial V_{ij} depende del espín, del isospín y del momento angular, estos operadores complican la ecuación hasta hacer imposible su solución analítica, por lo que tenemos que emplear métodos numéricos, lo cual, al tratarse de un problema de n cuerpos, y no disponer de un núcleo central como en Física Atómica, hace que sea imposible su resolución si no es mediante nuevas aproximaciones. Si consideramos que existe un potencial medio dentro del núcleo, obtenemos el modelo de capas; si asumimos que la superficie del núcleo se encuentra sometida a vibraciones y rotaciones, conseguimos el modelo de gota; si introducimos la energía de superficie, una fórmula semiempírica... Pero, con tantas simplificaciones, exigidas por el cálculo para poder predecir, ¿no estamos perdiendo la descripción total del núcleo? Además (cf. *ibid.*, p. 435),

How to evaluate the assumptions of the models that, on the one hand, permit us the experimental predictions of hundreds of data and, on the other hand, are falsified by an analogous quantity of data?

Entre las suposiciones que los científicos realizan para poder manejar matemáticamente la realidad del núcleo, y así salvar las apariencias, además de las citadas, se encuentran las siguientes: la utilización de funciones elementales, con el menor número posible de términos; facilitar la resolución de la ecuación de Schrödinger separando los

²³⁵ Cf. *ibid.*, p. 233.

VIII. EL INSTRUMENTALISMO DE LOS MODELOS TEÓRICOS

términos del Hamiltoniano, mediante la elección de potenciales simples o mediante aproximaciones de primer grado para conseguir soluciones exactas; reduciendo los grados de libertad del sistema suponiendo, por ejemplo, determinadas configuraciones, etc. Con estas suposiciones, la ciencia logra establecer una especie de puente entre los datos experimentales y la teoría disponible, construyendo una serie de modelos que tienen sólo una validez parcial, limitada, y cuyo único objetivo, según Boniolo *et al.* (*ibid.*, p. 441) es organizar de modo efectivo y eficiente un conjunto de datos empíricos referidos a un determinado dominio. Así,

1. The shell model works for N and Z not very far from the magic numbers;
2. the vibrational model works for $A < 150$ and even N, Z;
3. the rotational model works for $150 < A < 190$ and for $A > 230$ with even N, Z;
4. the model for γ -unstable nuclei works for $Z > 52$ and even $N < 80$.

Por otra parte, estos modelos nucleares se pueden clasificar en dos tipos: 1) modelos microscópicos, que atienden a la estructura microscópica del núcleo, y reducen los grados de libertad del sistema de ecuaciones a los mínimamente significativos; y 2) modelos colectivos, que tratan el núcleo como un todo y utilizan parámetros colectivos que describan sus giros y vibraciones. Esto parece sugerir una contradicción lógica en el seno de los modelos, pero que sólo se releva si tomamos las analogías como verdaderas, y no si consideramos estos modelos como lo que son: actitudes mentales para organizar esquemas predictivos y salvar pragmáticamente los fenómenos.

En conclusión, para Boniolo *et al.* (p. 448), es poco probable que en un futuro pueda existir una teoría (en sentido fuerte) capaz de sistematizar la abundancia de datos experimentales que se poseen del núcleo. La Física Nuclear sería una especie de *patchwork science*, y no permitiría ningún realismo sobre las teorías dispersas que intervienen en la formación de los modelos. A partir de BTB, y con el objetivo único de salvar las apariencias, los modelos se construirían y perdurarían como herramientas útiles de predicción y organización, sin que resultaran representaciones pictóricas reales del núcleo. Además, los autores no consideran que esta situación sea temporal, sino que están convencidos de que el uso de estos modelos es inevitable por la propia naturaleza de los fenómenos nucleares, más que por nuestra incapacidad para lograr una teoría unificada.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

A partir de aquí, quisiera exponer una serie de observaciones al análisis de Boniolo, Petrovich y Pisent:

1) En primer lugar, nada nos autoriza a pensar que la situación vaya a seguir así para siempre. La Física Nuclear es un campo relativamente novedoso, donde los experimentos se suceden y proporcionan una vasta serie de datos que esperan ser sistematizados y organizados, en busca de los principios comunes capaces de derivar todo el contenido experimental. Como los propios autores se encargan de señalar (*ibíd.*, p. 445), una teoría reduccionista, tal como existe en otros campos de la Física, tendría que predecir las propiedades observables de los fenómenos nucleares partiendo de los valores de A y Z ; habría que resolver un problema de n cuerpos y conocer a la perfección las interacciones entre los elementos del núcleo.

Ahora bien, ¿qué razones nos llevan a pensar que no se pueda lograr la unificación de los modelos en una teoría superior? A partir de un estado de la investigación, no podemos proyectar hacia el futuro lo que va a ocurrir; las mismas razones lógicas hay para apoyar la potencial existencia de la teoría como para decir que nunca se conseguirá. Pero hay una diferencia: los científicos trabajan para lograr semejante teoría “reduccionista”, y no se conforman con dejar las cosas como están. De momento, y por emplear el lenguaje de esta tesis doctoral, los modelos son construidos a partir de una serie de hipótesis \mathbf{H} no conectadas con los principios superiores de \mathbf{T} , el conjunto de leyes que la comunidad científica considera verdaderos. El hecho indiscutible es que estos modelos están siendo continuamente mejorados, lo que demuestra que *los científicos no se dan por satisfechos con tener una serie de modelos que simplemente se limiten a “salvar determinadas apariencias”*. Si lo único que contara para ellos fuera tener tales instrumentos de predicción, no investigarían un modelo capaz de sintetizar los logros de los anteriores modelos en una sola construcción derivada a partir de \mathbf{T} . Los avances son lentos, pero no se detienen. Como señalan Boniolo *et al.* (*ibíd.*, p. 442): “Models are continually modified to increase their efficiency in a given domain”. El modelo de capas es hoy mucho más preciso, gracias a su reformulación matemática a partir de tensores esféricos. El modelo de gota ha pasado de su formulación en términos clásicos hacia una reinterpretación cuántica, basada en movimientos giratorios-vibratorios... ¿Se deben estos cambios a que los científicos buscan una mayor precisión para cada dominio, o que buscan unificarlos en un modelo más general? ¿Ambas cosas, tal vez?

VIII. EL INSTRUMENTALISMO DE LOS MODELOS TEÓRICOS

A favor de esta última tesis estaría el hecho de los modelos nucleares también se utilizan en otros dominios relativamente distintos, como para los distintos tipos de decaimiento nuclear. A partir de las reacciones nucleares, de la emisión o absorción de electrones o positrones por un núcleo, o de la emisión de fotones de alta energía, se puede conseguir información sobre los estados excitados de los núcleos y reconstruir a partir de estos datos los propios modelos nucleares. Además, los resultados no sólo valen para los fenómenos nucleares, sino que se transfieren a otros campos de la Física, por ejemplo, a la hora de efectuar mediciones de la energía en el efecto Mossbauer. Los modelos nucleares *no parecen estar tan aislados* del resto de la Física como pudiera parecer a primera vista. Por otra parte, el modelo colectivo combina principios del modelo de gota y del modelo de capas; asumiendo que el potencial nuclear se deforma, y resolviendo la ecuación de Schrödinger para un potencial neto no esférico, es capaz de predecir más fenómenos que los modelos anteriores, como los momentos dipolares magnéticos o los momentos cuadrupolares eléctricos, a pesar de que aumenta la complejidad de la ecuación.

2) El empleo de las analogías, convenientemente destacado en el análisis de Boniolo *et al.*, nos muestra claramente que estamos dentro del *contexto de descubrimiento*, es decir, que se está *investigando*, a la espera de una mayor *justificación teórica*. El uso de los modelos de bajo nivel, empíricos, con ayuda de unas hipótesis relativamente aisladas, **H**, es una constante de la Historia de la Física. Ya he señalado en el Cap. II cómo los modelos astronómicos surgen en principio para lograr una mayor capacidad predictiva, utilizándose hipótesis tomadas de la Geometría a la espera de justificar teóricamente, a partir de unos principios físicos considerados verdaderos, la serie de modelos ptolemaicos y copernicanos desarrollados en principio para “salvar las apariencias”. *Pero éste es sólo un primer paso*, y hasta que los modelos no son deducidos a partir de una teoría estricta, los científicos no cejan en su labor de investigación. La apasionante historia de la Física Atómica, de donde la Física Nuclear toma buena parte de sus analogías, nos muestra hasta qué punto los modelos se construyen novedosamente a partir de hipótesis aisladas. Algunas de estas hipótesis formarán luego parte del conjunto de enunciados considerados verdaderos, **T**, como la ley de Planck, mientras que otros, como el modelo de Bohr, se desechan no sólo por razones empíricas, sino fundamentalmente teóricas, al entrar en contradicción con las leyes más importantes de **T**. *Un mode-*

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

lo, hasta que no es derivado directamente de una teoría T , se considera provisional, a la espera de su justificación teórica. Puede que en Física, especialmente en campos relativamente nuevos, siempre existan modelos provisionales, meramente empíricos, pero se trabaja para que formen parte del cuerpo de enunciados teóricos considerados verdaderos. ¿Por qué no habría de ocurrir así con los modelos nucleares? ¿Qué es más probable: que se refute el principio de indeterminación de Heisenberg, o que se logren unificar los modelos del núcleo?

3) Las suposiciones a partir de las cuales se construyen los modelos nucleares son hipótesis más o menos justificadas, y *de ningún modo resultan arbitrarias*.²³⁶ De nuevo, igual que sucedía en los modelos astronómicos, y en contra de lo que piensa Duhem, las hipótesis nunca son arbitrarias, si entendemos por “arbitrariedad” la libertad total que tendría un científico a la hora de elaborar hipótesis. En lo que Boniolo *et al.* denominan BTB, *Basic Theoretical Background*, hay hipótesis, efectivamente, de muy variada naturaleza; *pero por eso mismo no todas están igual de justificadas*. No es lo mismo igualar la masa del neutrón a la del protón, que no tomar en consideración las fuerzas de Coulomb, o proceder como si la ecuación de Schrödinger no existiera. El error que en cada caso se comete es muy distinto, y no siempre conviene perder significado físico a costa de ganar soltura en el cálculo.

Si lo único que buscaran los científicos fuera manejarse matemáticamente con la realidad sólo hasta cierto punto, no habría ninguna necesidad de utilizar ecuaciones tan complicadas como las del campo gravitatorio o de la Electrodinámica Cuántica. No se puede perder información física a costa de un cálculo más sencillo. Pero tampoco se puede ser tan estricto que no se pueda calcular ninguna de las variables, debido a los grados de libertad del sistema. Lo apasionante de la tarea física es lograr un *equilibrio* entre los datos experimentales y la teoría, de modo que, como ya he señalado en alguna ocasión, ningún plano prime sobre el otro.

Porque, mirando la cuestión un poco más de cerca, y considerando que la metodología científica es fundamentalmente una serie de decisiones acerca de qué enunciados se aceptan, y cuáles se rechazan, como afirmara Lakatos, *el científico tiene que decidir, entre todos los principios posibles, aquellos que, estando más justificados teóricamente,*

²³⁶ Lo que no podemos admitir es que estas hipótesis provengan de la nada.

VIII. EL INSTRUMENTALISMO DE LOS MODELOS TEÓRICOS

sean capaces de construir modelos que salven las apariencias. De hecho, los científicos prefieren utilizar la Mecánica Cuántica antes que recurrir a analogías con la Mecánica Clásica, pues están convencidos de que es mucho más precisa, como una y otra vez se ha venido demostrando. Los científicos, a la hora de construir un modelo, establecen una *jerarquía de principios*, un orden de *importancia* dentro de los enunciados teóricos a partir de los cuales van a construir sus modelos. Es decir, que no todo les da lo mismo: prefieren recurrir a leyes más contrastadas que otras, y sólo cuando no hay más remedio, y cuando consideran que han agotado todas las combinaciones de esas leyes fundamentales, o cuando tienen que simplificar las ecuaciones, sólo entonces, afirmo, recurren a una serie de hipótesis aisladas, como maneras *tentativas* de salvar las apariencias. Pero de aquí no podemos inferir que esto sea la norma habitual. Preferentemente, se siguen las *directrices* de la teoría, al menos como punto de partida.

4) En este sentido, debemos destacar el hecho de que casi todas las simplificaciones tienen como objetivo fundamental *aplicar* la ecuación de Schrödinger. Éstos son los modelos más justificados, que desde el primer momento están pensando en la teoría de orden superior a la que consideran verdadera. Por supuesto, uno puede empeñarse en no utilizarla, y fijarse sólo en los conceptos mínimos para lograr salvar las apariencias. Ahora bien, por una parte, no debe ser tan sencillo como parece, pues no se ha logrado todavía; y por otra, habría que justificar por qué la ecuación no es válida en este dominio. Insisto en que las hipótesis nunca son arbitrarias, y que están más o menos fundamentadas. La referencia última es siempre el sistema físico, sistema del que por otro lado, como también señalan Boniolo *et al.*, se conocen sus leyes fundamentales.

Pero, si se conocen más o menos las fuerzas que actúan dentro del núcleo, sus componentes, las propiedades más importantes de estos elementos, sus relaciones básicas, su carga, su masa, su espín, etc., ¿por qué no somos capaces de elaborar una teoría casi de forma inmediata? Boniolo *et al.*, como físicos, son conscientes de las enormes dificultades de solucionar un sistema de n nucleones que puede llegar a ser muy grande, sin una fuerza central como en el átomo, donde no pueden calcularse los movimientos particulares de estos elementos, donde teóricamente habría que aplicar la estadística cuántica, tan distinta en sus fundamentos de la estadística clásica browniana... Ahora bien, ¿no están apelando, en última instancia, a *dificultades técnicas*? Quiero decir: las dificultades que surgen a la hora de solucionar una serie complicada de ecuaciones dife-

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

renciales, donde no hay una solución directa, y donde hay que tratar con soluciones numéricas, con la ayuda de gigantescos ordenadores y de todo el arsenal de métodos de resolución de ecuaciones diferenciales, tan complejas y difíciles de dominar... Reconociendo todas estas complicaciones, ¿por qué estamos autorizados a pensar entonces que no se trata de nuestra incapacidad, sino que es cuestión de la propia naturaleza, que no se deja tratar matemáticamente?

Una cosa son las ecuaciones, y otra donde se aplican. Con una serie de condiciones iniciales ya tenemos un modelo. Si seguimos simplificando, seguimos acumulando error; siempre que este error no se dispare, y permanezca dentro de ciertos márgenes, estamos autorizados a continuar, hasta ser capaces de resolver el problema. *La justificación teórica, en este caso, desciende a medida que nos empeñamos en calcular.* Lo más normal, entonces, es que el modelo sea válido sólo *limitadamente*, es decir, que prediga ciertas propiedades mientras que en otras falle estrepitosamente. Pero eso no es culpa de la naturaleza, se trata de una limitación *nuestra*, hasta que encontremos una teoría que ligue directamente todos los datos experimentales a partir de una fórmula, por muy complicada que ésta sea. Los problemas son debidos, entonces, a *nuestra incapacidad*, pero a una incapacidad *limitada*, puesto que a) se conocen cuál es la causa de que fallen estos modelos, pues se conoce cuál es la magnitud del error que se comete, por ejemplo, despreciando las fuerzas electromagnéticas y gravitatorias a favor de la interacción fuerte, o no tomando en consideración la influencia de los electrones; y b) tal incapacidad puede solucionarse mediante la investigación, hasta derivar los modelos de una teoría superior²³⁷. En todo caso, existen los mismos motivos para creer que los problemas del núcleo se solucionarán como que no. Nadie puede prever el futuro.

Porque una cosa es pensar que sea difícil (o extremadamente difícil) que haya una teoría, y otra cosa muy distinta es pensar que *necesariamente* no exista. En este último caso, hay que especificar de forma concluyente por qué, tal y como en Teoría de Computación, por ejemplo, se demuestra que ciertos problemas son indecibles. Sin duda que esta limitación, si se consiguiera, lejos de constituir un defecto, constituiría un logro

²³⁷ Sin embargo, tal vez la ciencia de nuestra época se caracterice por la ausencia de grandes teóricos, que son los que podrían realizar las sucesivas síntesis. Un ingeniero soluciona problemas técnicos, a la vista de una serie de ecuaciones fundamentales. Un científico debería ser capaz de descubrir nuevos principios teóricos.

VIII. EL INSTRUMENTALISMO DE LOS MODELOS TEÓRICOS

formidable para la Física, o más bien para la Metafísica, entendida como una disciplina sobre los límites de la Física²³⁸.

5) Por último, de modo general, no comparto la opinión de Boniolo de que los modelos sean ficciones. La palabra “ficción”, del latín *fictio*, “formación”, “creación”, y aunque recoja el significado de “suposición” o “hipótesis”, e incluso el de “simulación”, no me parece la más adecuada. Una ficción es una cosa que no existe, y que es fruto de la imaginación. Una ficción es un unicornio, una energía “limpia”, o la Atlántida de Platón, pero no un modelo de Universo de Einstein, ni un modelo de núcleo, por muy aproximado que sea. Si las hipótesis que generan el modelo están relativamente justificadas, tanto teórica como empíricamente, es difícil pensar que lo que se obtiene sea una ficción. En todo caso, desde el momento en que unos modelos están más justificados que otros, existiría cierta *gradación* en la ficción, de manera que algunos modelos (como los de Bohr) tuvieran más de ficción que los modelos que parten de la ecuación de Schrödinger. Por otra parte, aunque los elementos del modelo no tengan una correspondencia directa con la realidad, eso no significa que sean fruto de nuestra imaginación: un sistema de puntos-masa, una palanca, un péndulo ideal, un tensor de inercia, puede que no sean reales, en el sentido de que no se den por sí solos en la naturaleza, pero eso no les hace ser ficciones: *son síntesis, esquemas físicos, abstracciones, pero que en todo momento se refieren a la realidad*, entre otras cosas porque extraen de ella lo realmente interesante, lo que cuenta, su potencialidad física, sus indicadores fundamentales; en definitiva, la información básica a partir de la cual describir y predecir su comportamiento, allí hasta donde nuestras posibilidades técnicas nos lo permitan.

8.5. Racionalidad científica: epistemología y metodología

No son pocas las voces que dicen que deberíamos escuchar en todo momento a la ciencia y esperar que ella misma nos resuelva todas las cuestiones que pudieran surgir sobre su método y manera de estructurar el mundo. Pero no creo que ninguna ciencia en general y ninguna teoría en particular puedan aclarar algo sobre la naturaleza de la represen-

²³⁸ No basta decir que hay un problema de n cuerpos, pues este problema ya está presente en la Mecánica Clásica, donde existen métodos rigurosos de aproximación.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

tación. Esto significaría que la ciencia pudiera hablar de sí misma, con relación a su fundamento, de la misma manera que habla del mundo a través de sus teorías y modelos.

Pero la representación científica parte de ciertas reglas metodológicas que no puede alcanzar apelando a sus leyes fundamentales. Ni la teoría de Darwin, ni la Mecánica Cuántica, ni cualquier teoría futura van a pensar por encima de lo que la ciencia *ya* ha supuesto que es el mundo. Su suposición básica es que la realidad es *reducible* a un sistema, y que puede formarse un modelo de las cosas investigando las relaciones de proporcionalidad que se dan entre propiedades fundamentales del mundo. Describir científicamente un fenómeno no es nada más ni nada menos que proporcionarle una ecuación que permita predecir su comportamiento. Una ecuación puede predecir, precisamente, porque hace algo más que “resumir”, y apunta más allá de los datos que se disponen. Pero una predicción es tan sólo un *cálculo*, que se consigue sustituyendo valores concretos en la ecuación; predecir consiste en *determinar* valores, en calcular magnitudes, dada una serie de condiciones iniciales. La esencia de la ciencia, entonces, es determinar valores, predecirlos.

Sin entrar en discusiones acerca de la descripción que la Mecánica Cuántica hace del mundo, su esencia es la misma que cualquier otra teoría científica: predecir, *determinar*. La ecuación de Schrödinger, en principio, no tiene que tener más misterio que el que tiene la segunda ley de Newton: es una ecuación dinámica, en derivadas parciales, que afirma una relación entre cantidades físicas. La Mecánica Cuántica no describe el mundo de diferente forma que la Mecánica Clásica, en el sentido de que no va más allá de una serie de ecuaciones, por muy complicadas que sean. No es necesario pensar que “la medida no existe antes de la interacción”, o cosas similares, para creer que la teoría es verdadera allí hasta donde somos capaces de medir, y hasta que no se demuestre lo contrario.

No hace falta acogerse a la interpretación de Copenhague para considerar que la teoría, desde un punto de vista instrumental, es una serie de ecuaciones que se están suponiendo que son verdaderas desde el momento que actúan como premisas o reglas de inferencia. Es decir, la carga instrumental de la Mecánica Cuántica es idéntica a la del resto de las teorías. Sus propiedades, aunque de otra manera, siguen obedeciendo a leyes causales. La probabilidad es una propiedad física *más* de los sistemas, que pasa de forma causal a través de los estados del sistema. Son leyes estadísticas, pero reguladas

VIII. EL INSTRUMENTALISMO DE LOS MODELOS TEÓRICOS

de forma necesaria a través de leyes causales, y determinada en todo momento a través del cálculo. La Mecánica Cuántica no hace nada distinto, respecto del método general de representación, de lo que siempre se ha venido haciendo en Física: determinar, calcular, predecir cantidades relevantes.

Una teoría no es, por sí sola, ni instrumentalista ni realista. Desde el punto de vista estrictamente matemático, una ecuación se limita a calcular cantidades, es decir, a *determinar* valores. Sólo comparativamente, ante lo que supuestamente deja de hacer, se la tacha de “indeterminista”. Pero esto ocurre *desde fuera* de la teoría, cuando se la interpreta²³⁹. Pero no hace falta llegar a este extremo. Las prodigiosas leyes de la Mecánica Cuántica, el continuo asombro al que nos ha sometido desde su nacimiento, hace más de un siglo, no tiene por qué significar que el método general de representación científica haya cambiado. Cabría pensar, por el contrario, hasta qué punto se somete a él, cuando simplemente se atiene a una serie de medidas que sistematiza en sus representaciones.

El debate entre realistas e instrumentalistas es un debate filosófico, que no puede ser reducido a un debate científico sobre lo que dice tal o cual teoría respecto de la estructura de la realidad. Ninguna teoría científica, por sí misma, es realista o instrumentalista, antes de que se la analice epistemológicamente. Desde el punto de vista del método, que es el que defendemos aquí, las teorías se dedican a predecir, calcular y *determinar*, y todas ellas suponen que la realidad es *reducible* a un sistema que liga estados de cosas mediante una serie de reglas. Las teorías definen sus estados y sus leyes, pero no dicen nada sobre la estructura última de la realidad, puesto que sólo se dedican a ordenarla y sintetizarla²⁴⁰. En particular, ninguna teoría nos va a aclarar cuál es la relación que existe entre un modelo científico y la realidad, en caso de ser más o menos aceptable.

Una teoría científica no puede volverse contra el método general de representación, pues constituye su fundamento y lo que la hace posible. La Filosofía de la Ciencia

²³⁹ Que la teoría no permita que se mida sin cierta incertidumbre la posición y la cantidad de movimiento de una partícula, ¿significa que la teoría es “indeterminada” (en el sentido de que no pueda calcular), que esté incompleta o que se manifieste a favor del instrumentalismo? En tal caso, ¿no estaría el instrumentalista siendo realista a la hora de aceptar la verdad de una teoría en particular para afirmar su escepticismo respecto de la capacidad de todas las teorías científicas?

²⁴⁰ La ciencia explica, pero eso no significa que “comprenda”.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

es una disciplina que investiga el método científico, y tiene que partir de consideraciones generales y comunes a todas las teorías para averiguar la esencia de ese método. En este sentido, las teorías son un conjunto de reglas de inferencia más o menos útiles a las que se ha considerado verdaderas desde el momento en que forman parte de las premisas de un argumento lógico. Las leyes son enunciados condicionales que pretenden ser universales dentro de su alcance, es decir, dentro de las condiciones especificadas en su antecedente, sin que sea preciso añadirle circunstancias *ceteris paribus*. El diseño experimental trata de aproximarse todo lo que puede (dentro de un margen de error) a esas condiciones ideales donde las leyes tienen sentido, y la investigación sobre el alcance o validez de las leyes científicas permite averiguar las limitaciones de los modelos frente al alcance superior de otros modelos más generales que pueden justificarse teóricamente.

Dentro de una concepción instrumentalista, podemos considerar que el conjunto de enunciados teóricos aceptados como verdaderos es una serie de reglas de inferencia que permiten derivar datos de observación, bien sea para explicarlos o para predecirlos. Esas reglas de inferencia, en todo caso, no son verdades eternas que no pudieran precisarse y modificarse. Lo que un científico necesita, desde el punto de vista metodológico, son *pautas deductivas* que puedan proporcionar *nuevos* teoremas, o que *justifiquen* deductivamente los que ya se conocen. Para ello *supone como ciertas* determinadas ecuaciones que actúan como medios para lograr el fin de la representación: la predicción o la explicación.

Por eso se habla de “verificación” y de “confirmación”. No porque exista un algoritmo o procedimiento mecánico para comprobar las verdades o tesis del sistema, ni porque pueda asignarse un número entre el 0 y el 1 como medida objetiva de la confianza que un científico muestra en una hipótesis a partir de la evidencia disponible. Por el contrario, *la confirmación de una teoría equivale a que se sigue considerando verdadera hasta que deja de funcionar*. Ya que se la ha supuesto verdadera, cuando tiene éxito en una serie de aplicaciones más o menos novedosas, un científico puede decir que “se ha confirmado” o “verificado” en esas nuevas aplicaciones. El uso del verbo “confirmar” debe de asociarse, pues, al convencionalismo que sostiene el edificio de la ciencia.

VIII. EL INSTRUMENTALISMO DE LOS MODELOS TEÓRICOS

Las teorías quieren ser verdaderas, y no falsas: basta estudiar las reacciones de Einstein en su polémica con la Mecánica Cuántica²⁴¹. Esto trae como resultado una tendencia de la teoría a inmunizarse, a crearse una serie de enunciados más o menos intocables, con el fin no sólo de salvarse a sí misma, sino de conservar todos los logros que hasta la fecha ha realizado. En el caso del perihelio de Mercurio, es fácil decir que allí ocurrió un experimento crucial, lo mismo que en el experimento de Michelson-Morley, porque la Teoría de la Relatividad fue capaz de reproducir, *reinterpretándolos*, todos los éxitos anteriores de la Mecánica de Newton. Pero, ¿qué ocurriría si ninguna teoría ocupa el lugar de la que acaba de fracasar en uno de estos “experimentos cruciales”? Quedaría un *vacío empírico*, una serie de hechos registrados que se habrían quedado sin explicación. ¿Habría que empezar de nuevo, reconstruir todo el árbol de la Ciencia Física? No parece razonable²⁴².

Ante un desacierto, *las correcciones de un modelo se realizan de arriba hacia abajo, modificando lo justo para que el modelo funcione y sea capaz de predecir*: no se viene abajo todo el edificio; eso sería ir contra el progreso científico, y no existiría algo así como una acumulación de “verdades”, ni de hechos, puesto que no habría manera de registrarlos.

Las leyes cambian, o, mejor, se reinterpretan; leyes que han sido consideradas verdaderas en otro momento son falsas. Pero también ocurre lo contrario: se descubre la verdad de ciertos enunciados que habían sido tomados por falsos²⁴³. *La falsación, al igual que la verdad, tampoco es para siempre*. Además, ni siquiera estamos seguros de que los casos que confirman una ley puedan ser reinterpretados a la luz de una nueva

²⁴¹ A este respecto, véase Deligeorges, ed. (1990, pp. 51-62, 85-98, 127-142). También la ciencia puede progresar defendiéndose de la falsación, haciendo excepciones, incluyendo principios *ad hoc*, explicando, en definitiva, por qué la teoría falla en determinadas circunstancias. De hecho, esto es lo más racional.

²⁴² El conocimiento científico es una memoria de hechos y fórmulas. El conocimiento de una época consiste en su conjunto de hechos registrados y su conjunto de reglas (leyes) para derivar (deductivamente, mediante un algoritmo) estos hechos.

²⁴³ Ejemplos clásicos son la naturaleza corpuscular de la luz, presuntamente “falsada” con los experimentos de Fresnel, y los modelos atómicos de Dalton, rechazados hasta 1850, cuando fueron reintroducidos por Clausius. Puede que la ciencia, en su totalidad, sea una continua falsación, pero también, primeramente, es una continua confirmación, un continuo “hacer verdadero” y un continuo “volver a hacer verdadero”.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

teoría que haga de la ley anterior una mera aproximación. En ciertos dominios, la teoría anterior seguiría siendo aceptable empíricamente, y sin embargo, a la luz de la nueva teoría, ya habría sido falsada (mejor dicho, “precisada”). En este caso, la falsación se produciría sin que mediara ningún experimento en contra. Popper se equivoca, desde luego, al suponer que el criterio de falsación se libra de los problemas que tiene el criterio de confirmación: más bien parecen dos caras de la misma moneda.

En Lakatos (1974, 1975), hay un centro firme convencionalmente aceptado, el núcleo teórico, que dirige la heurística positiva, y que se acepta por convención. Es lo que yo he denominado **T**, el conjunto de leyes fundamentales a partir del cual se construyen los modelos. Al mismo tiempo, de acuerdo con el falsacionismo, hay un conjunto de enunciados de observación aceptados, **D**, punto de partida para la modelización²⁴⁴. El mérito fundamental de Lakatos consiste en considerar la actividad científica como una *serie de decisiones* sobre qué enunciados se aceptan y cuáles se rechazan, idea que comparto plenamente.

Ahora bien, yo no considero que lo que se evalúa sean series de teorías, sino series de modelos. Los modelos de la Mecánica Cuántica, o de la Teorías de la Relatividad, siguen perteneciendo a las mismas teorías, y no constituyen cosas diferentes. Lo que ha variado, efectivamente, son las condiciones de aplicación de la teoría, las condiciones iniciales de los fenómenos y las caracterizaciones de los mismos según distintos niveles de generalidad y dificultad. Pero la serie de modelos no son teorías distintas. Lo que Lakatos llama el “núcleo firme” es lo que yo considero la teoría, **T**, de la que no hago formar parte el cinturón de hipótesis auxiliares. El modelo es la aplicación de la teoría, no la teoría misma, por lo que más que una serie de teorías T_1, T_2, \dots, T_n , que forman parte de un programa de investigación, lo que tenemos es una serie de modelos M_1, M_2, \dots, M_n , formados a partir de la teoría **T** y con la ayuda de hipótesis auxiliares, simplificaciones o aplicaciones particulares a una serie de fenómenos.

Esta serie de modelos no es una familia de estructuras realizadas, sino de imágenes o esquemas que informan sobre lo que hasta la fecha se conoce de un fenómeno determinado. M_i , cualquiera que sea su nivel de generalidad, es una representación, y no

²⁴⁴ Si el conocimiento científico de una época está constituido fundamentalmente por a) sus medidas, y b) las ecuaciones que dispone para explicar esas medidas, el progreso científico se debe a la potencialidad predictiva de las ecuaciones, ya que la ciencia no puede explotar de una vez todas las consecuencias de una teoría debido a sus limitaciones técnicas.

VIII. EL INSTRUMENTALISMO DE LOS MODELOS TEÓRICOS

un sistema que se plasme en la naturaleza ajustándose a la perfección, sino con diferentes grados de aproximación, y nunca de manera exacta. Los modelos, además, se sitúan jerárquicamente según las hipótesis asociadas a ellos, y no todos resultan de la misma importancia. Los programas de investigación resultarían simplemente desarrollos teóricos que modelizan nuevas situaciones o fenómenos en una búsqueda incesante de nuevas informaciones que permitan mejorar las hipótesis que se asocian a los modelos. Así, las nuevas versiones de los modelos tienen en cuenta los resultados experimentales, no para quedar refutados, sino para mejorar, para hacerse más precisos, para corresponder de forma más exacta a los resultados experimentales.

Cada modificación de las hipótesis tendrá como resultado otro modelo, *otra versión*, que diferirá más o menos del modelo original según haya sido la profundidad de los cambios. La serie de modelos “progresan” si ofrece soluciones, si predice cosas nuevas, y si soluciona parte de las anomalías; en este caso, la teoría sigue siendo aceptable, porque tiene la *flexibilidad* suficiente para adaptarse a nuevas situaciones. En caso contrario, en el límite, cuando la teoría ha dejado de ofrecer soluciones, los científicos buscarán otras hipótesis inconsistentes con el cuerpo de enunciados aceptados **T**, y construirán modelos teóricos de bajo nivel, con hipótesis tomadas de **H**, y no derivadas directamente de **T**. Si la nueva serie de modelos, al principio con un alcance limitado, tiene éxito, los científicos se preguntarán hasta qué punto el conocimiento anterior es *revisable* a la luz de las nuevas hipótesis **H**, y si es posible reinterpretar parte de ese conocimiento con lo que ya va siendo considerado una nueva teoría **T'**.

Las distintas series de modelos no son entes aislados entre sí, no corresponden a “mundos distintos”, ni a diferentes formas de sentir o pensar la realidad; simplemente, son formas diferentes de *cuantificar* los fenómenos, diferentes *reglas de medir* las cosas. Ahora bien, suponiendo que la naturaleza sea un sistema que vincula estados de cosas de acuerdo con una serie de reglas o leyes, y dado que el análisis dimensional permite la creación de un lenguaje común de observación, las teorías pueden dejar de ser rivales y convertirse en una sola teoría. Las series de modelos incompatibles entre sí no tienen por qué durar para siempre; no sólo son sustituidos, no sólo son refutados, también son incorporados en una teoría más amplia y abstracta.

Por situarnos momentáneamente fuera de la Física, pensemos en la síntesis de la teoría de Mendel y de Darwin, en Biología, efectuada con mucho esfuerzo a lo largo de

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

los siglos XIX y XX²⁴⁵. En este caso, partimos de teorías diferentes, en principio incompatibles, pero que a la larga aparecen fundidas en una sola teoría que predice con éxito los hechos anteriores y unifica el contenido experimental de las dos teorías. En Física, son muchísimos los casos donde unas teorías son reducidas a otras, o donde una síntesis teórica reinterpreta los hechos conocidos dándoles una formulación distinta que es capaz de explicar los problemas, las anomalías y los éxitos. Ejemplos clásicos son la reducción de la Termodinámica del siglo XIX a la Mecánica de Boltzmann (que relaciona la entropía con las configuraciones moleculares del sistema), o la síntesis cuántica de las ópticas corpuscular y ondulatoria. Para el caso de grandes teorías incompatibles en los principios fundamentales (aquellos que potencialmente figurarían a la cabeza de todas las demostraciones), la incorporación o reducción se produce cuando se muestra cómo obtener las ecuaciones fundamentales de una a partir de las ecuaciones de la otra. Así, se puede derivar la segunda ley de Newton a partir de la ecuación de Schrödinger, considerando que la función potencial $V(x)$ cambia muy lentamente y que permanece constante sobre una distancia del orden de la longitud de onda de De Broglie²⁴⁶. Sin embargo, debemos tener en cuenta que en este caso *las derivaciones no son límites matemáticos, sino aproximaciones, que no resultan justificadas siempre*. En particular, no resultarán válidas cuando traten de explicar los hechos que dieron lugar a la nueva teoría.

La reducción e incorporación de unas teorías a otras es una consecuencia necesaria de la modelización científica si consideramos que el modelo es un *explanans* que permite deducir un *explanandum*. Es decir, la racionalidad científica es inseparable del concepto de explicación teórica, entendida como una subsumición de ecuaciones o datos a partir de la capacidad deductiva de las ecuaciones, aproximaciones y datos que conforman el *explanans*. El progreso científico es una deducción de los enunciados observacionales y teóricos que habían sido considerados verdaderos con anterioridad. Una teoría contemporánea explica las anteriores si es capaz de deducir sus ecuaciones correctas.

²⁴⁵ La escuela darwinista pensaba que la evolución ocurría en pequeños cambios, mientras que los mendelianos apoyaban los grandes saltos discontinuos. La solución de la aparente contradicción pasaba por demostrar que las variaciones de Mendel podían originar pequeñas variaciones que se seleccionarían posteriormente. Las diferencias entre estas variaciones desaparecieron cuando se descubrió que el gen que se segregaba producía un efecto pequeño. Véase, por ejemplo, Rose *et al.* (1983, pp. 41-55).

²⁴⁶ Cf. Eisberg y Resnik (2000, pp. 223-224).

VIII. EL INSTRUMENTALISMO DE LOS MODELOS TEÓRICOS

Lo que significa que las teorías se incorporan en el seno de otras que *reinterpretan* el contenido empírico de las anteriores y resultan mucho más justificadas, precisas y generales.

La unidad de la ciencia sólo es posible mediante la incorporación de teorías incompatibles entre sí, y no solamente mediante su rivalidad y su carácter alternativo. Esto es debido a la necesidad de *sistematización* que la ciencia tiene de todo lo que conoce acerca de la naturaleza, en el sentido de poder derivar lógicamente las leyes y hechos conocidos a partir de un número reducido de principios consistentes entre sí. El afán unificador de la razón trata de sistematizar todos los hechos, leyes y teorías en la serie de fórmulas o ecuaciones más *comprehensivas* posibles, con el fin de considerar todos los fenómenos de la naturaleza análogamente, hasta donde sea posible, y obteniendo con ello un criterio preciso para su clasificación²⁴⁷.

Mi conclusión general, por tanto, es que la racionalidad científica consiste en un proceso de mejora, sustitución o ampliación de los modelos a partir de los nuevos fenómenos que se van conociendo. Tanto para la epistemología realista como para la instrumentalista las leyes se mantienen vigentes hasta que dejan de explicar y predecir. Es decir, tanto el realista como el instrumentalista afirman un “como si fuera verdadera” que mantienen hasta que no les queda más remedio que modificar el modelo. Un científico, por sí solo, no es realista ni instrumentalista: se dedica a modelizar los fenómenos, a suponer que hay una regla básica para derivar estados de cosas: esto es una descripción, a partir de la cual es posible la predicción y la explicación.

La ciencia muestra que hay alguna “relación” entre el modelo y la realidad desde el momento en que no todas las soluciones son válidas para un problema, y que, dentro de las soluciones posibles, no todas están igual de justificadas desde el punto de vista teórico. Como he insistido una y otra vez en esta tesis, la ciencia muestra un “*no da lo mismo*” que puede resultar perturbador para el instrumentalista que no se haya equipado

²⁴⁷ Es posible, sin embargo, que la tarea de unificación científica *nunca termine*, exactamente igual que ocurre con la diversificación. Del mismo modo que siempre habrá modelos más específicos que apliquen el contenido empírico de las teorías a fenómenos cada vez más particulares, cabe pensar que siempre habrá un modelo más abstracto que sea capaz de subsumir los principios fundamentales existentes en una determinada época. Si la ciencia tuviera una meta objetiva, a la cual nos iríamos aproximando, existiría una síntesis última que no se podría superar ni precisar.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

mínimamente con una teoría de la verdad como correspondencia²⁴⁸. Por otra parte, el instrumentalista tiene razón al afirmar que no existe ningún tipo de correspondencia entre nuestros modelos y la realidad, porque eso significa dar un salto injustificado desde el plano real hasta el plano lingüístico, teórico. En este sentido, creo haber demostrado que nada justifica pensar en un isomorfismo o en una similaridad entre nuestros modelos y el mundo.

Mi propuesta de que el modelo *sintetiza* la información disponible que se conoce hasta la fecha de un fenómeno, trata de ser justo con ambos principios epistemológicos, y se sitúa en un punto medio que intenta recoger lo mejor de estas posturas enfrentadas. Sin embargo, por un lado, el instrumentalista considerará esta noción demasiado sospechosa desde el punto de vista metafísico, mientras que el realista la considerará demasiado débil. He intentado, sin embargo, atenerme al punto de vista metodológico para elaborar esta noción. En este sentido, un modelo, entendido como una síntesis explicativa, es neutral respecto del realismo y del instrumentalismo, y se dedica simplemente a constatar que *el modelo trata de ser lo más eficiente posible, primero, ajustándose cuanto puede a las medidas experimentales, y segundo, siendo todo lo coherente que puede con un conjunto de enunciados teóricos aceptados.*

Dudo que la Filosofía pueda ir más allá del concepto de síntesis para explicar la relación entre modelo y mundo. Se podría utilizar la noción de analogía, pero siempre que se indicara que no es una relación de estructuras algebraicas, ya que la naturaleza no está definida, por sí sola, como estructura. Así, habría que entrecomillar la palabra, por ejemplo, “analogía”, o “simulación”, para indicar que realmente no se está afirmando un parecido entre cosas comparables, porque mundo y lenguaje son dos cosas totalmente distintas. Además, la similaridad supone el isomorfismo, porque el único parecido que muestran el modelo y la realidad depende de la capacidad efectiva del modelo para ajustarse a los datos experimentales.

Creo que esta es la posición de Wittgenstein en el *Tractatus* , cuando afirma 1) Nos hacemos imágenes (*Bilder*) de los estados de cosas; 2) Hay “algo en común”, “algo idéntico”, entre los estados de cosas y los modelos; y 3) Eso que tienen en común (“la forma de figuración”) no puede ser dicha desde el lenguaje, sólo puede ser mostrada²⁴⁹. Así, la ciencia mostraría mediante sus modelos esta “analogía”, esta “igualdad de for-

²⁴⁸ Esto es lo que hemos hecho nosotros: Verdad = Precisión.

²⁴⁹ Véase Wittgenstein (1922): 2.1 - 2.225, 4.05 - 4.06.

VIII. EL INSTRUMENTALISMO DE LOS MODELOS TEÓRICOS

ma”, pero no podría especificarse el significado de esta relación, porque ello supondría ir más allá de lo que nos permite el lenguaje²⁵⁰. La ciencia, desde luego, no puede hacerla explícita, y tendría que conformarse, en principio, con la noción de síntesis.

Nuestros modelos, efectivamente, y como piensa Wittgenstein, *sólo tocan la realidad en la medida*; sólo *ahí* cabe hablar de comparación y adecuación. Son, entonces, *reglas de medir*, objetos con una determinada capacidad resolutive. Pero no por ello se dan desordenadamente, sino que hay reglas más precisas que otras, y leyes que se subordinan a otras. Es una cuestión de eficiencia, de ahorro, como pensara Mach. Modelizar es sistematizar, y esto incluye la diversificación y la unificación.

Ahora bien, admitiendo, como yo he hecho, que el progreso científico consista en un progreso teórico ligado indisolublemente al progreso empírico, y que la verdad, por tanto, sea una cuestión de precisión, de cierta mejora en el detalle, de “ver mejor que antes”, ¿significa esto que hay cierta *aproximación* a la verdad última, cierta *convergencia* hacia el sistema “final” de la realidad, incluso admitiendo que tal ideal sea *inalcanzable*?

La respuesta a esta pregunta depende de la creencia o no en un *elemento último* de la realidad que es imposible decidir racionalmente. Esto supondría pensar que la Naturaleza, de pronto, se detendría, de manera que pudiéramos disponer de una serie de *medidas definitivas* de la realidad, es decir, una serie de enunciados de observación que no pudieran ser precisados con posterioridad. Mediante la comparación de los resultados que arrojaran nuestros modelos y esas medidas definitivas podríamos establecer un porcentaje de acierto que nos indicaría cuánto nos queda por llegar a la verdad. Pero nosotros no disponemos de una medida definitiva de la realidad, no disponemos de un criterio definitivo a partir de la cual pudiéramos comparar los “avances” que hemos realizado. *Porque no sólo las ecuaciones se precisan, también los enunciados de observación.* Lo que hoy nos parece una medida muy precisa puede considerarse en un futuro como una “mala medida”, porque tal vez no disponíamos de los elementos teóricos necesarios para realizarla de forma más ajustada. Nunca estamos tan cerca de la verdad como suponemos.

²⁵⁰ Wittgenstein, *op. cit.* 4.12: “La proposición puede representar la realidad entera, pero no puede representar lo que ha de tener en común con la realidad para poder representarla -la forma lógica. Para poder representar la forma lógica, deberíamos situarnos con la proposición fuera de la lógica, es decir, fuera del mundo.” También 2.172: “Pero la figura no puede figurar su forma de figuración: la ostenta”.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Un realista tiene que suponer un sistema final e inalcanzable, a partir del cual puedan compararse los logros científicos temporales. El sistema de la realidad se iría entonces descubriendo poco a poco, sin que ello significara que algún día se descubriera del todo. Si la verdad es una cuestión de precisión, ese sistema, presumiblemente, a través de las nuevas teorías y las nuevas mediciones, se iría también precisando, de modo que las nuevas leyes científicas fueran más “verdaderas” que las anteriores, en el sentido de que fueran más precisas y comprensivas... Pero el instrumentalista puede considerar que simplemente son instrumentos más eficientes como memoria reproductiva de los hechos, y como modo de organizar todo el conocimiento a partir de un *software* más sofisticado y avanzado, sin que en ningún momento toquemos o nos aproximemos a la verdad²⁵¹.

Pero la contradicción queda superada en la práctica, en el *método*, donde todos se entregan a una única labor: la sistematización de los hechos conocidos, del *corpus* del conocimiento anterior, a partir de lo nuevo que se va conociendo.

8.6. Recapitulación

La verdad científica es una *convención*, un “tener por verdadero”. Una serie de ecuaciones se considera verdadera hasta que otras ecuaciones más *precisas* las sustituyen, y explican cuál era la causa del éxito de las anteriores. Con ello se produce una *reinterpretación* de lo ya conocido a partir de lo nuevo que se va conociendo. Las teorías anteriores quedan como *aproximaciones* para determinados dominios, y mediante una serie de *simplificaciones* se puede, efectivamente, obtener las ecuaciones anteriores. Pero esto no significa que existan “límites matemáticos” entre las teorías. Las constantes que incorporan las nuevas teorías no son variables, y *no tienden a nada que no sea la cantidad constante que representan*, aunque su valor exacto nunca se conozca del todo y pueda seguir siendo precisado con los avances teóricos, técnicos y experimentales. La velocidad de la luz, los números cuánticos, la constante de Planck, no desaparecen milagro-

²⁵¹ Cf. *Crítica de la razón pura*, A 452-A 456, B 480-484. Kant, Cuarta de las *Antinomias de la Razón Pura*, donde afirma que el mismo rigor hay en la demostración de que hay leyes verdaderas en la naturaleza, leyes a las que nos iríamos aproximando, como en la demostración de que todo lo que ocurre es contingente, y es absurdo preguntarse por una causa incondicionada.

VIII. EL INSTRUMENTALISMO DE LOS MODELOS TEÓRICOS

samente en ciertas regiones de la naturaleza para volver a aparecer en otros órdenes de magnitud. Que los efectos sean mínimos, en relación con el fenómeno que se estudia y la tolerancia de error permitida, no significa que dejen de estar presentes en algún momento. Ninguna velocidad física, y menos la velocidad de la luz, puede hacerse infinita porque es justamente lo que la Teoría de la Relatividad prohíbe. Si la constante de Planck se hace cero, no hay ningún límite clásico donde la Mecánica Clásica y la Mecánica Cuántica se encontrarán; la Mecánica Clásica se encontraría totalmente sola y consigo misma, porque habría desaparecido todo el fundamento de la Mecánica más avanzada (entre otras cosas, el principio de indeterminación de Heisenberg). Despreciar la velocidad de un móvil respecto de la luz no constituye ningún límite, sino una *mera aproximación*, útil en determinados casos, pero no en todos, y por supuesto nunca en los experimentos más avanzados, donde el error que se comete es demasiado grave. El símbolo “ \rightarrow ”, que expresa un límite matemático, no debe confundirse con el de “ \approx ”, que expresa una aproximación más o menos justificada.

Especialmente relevante me parece mi análisis de la “subdeterminación empírica”, de la posibilidad de que modelos incompatibles ofrezcan las mismas predicciones para determinados fenómenos, y que supuestamente impedirían una decisión racional, basada en criterios empíricos, sobre cuál elegir como “verdadera” representación del fenómeno. Pero *el rechazo del isomorfismo no significa aceptar la subdeterminación empírica*. La utilización de sistemas equivalentes complementarios y compatibles ya implica un rechazo del isomorfismo, sin que sea necesario afirmar la incompatibilidad de los principios, puesto que corresponden a distintos esquemas que en realidad sintetizan una misma esencia física. Para el caso de teorías y modelos fuertemente incompatibles entre sí, donde se dé una igualdad predictiva que no permita comparar empíricamente los modelos utilizados, basta con ampliar el alcance y enfrentarlos en otros dominios donde intervienen exactamente las mismas magnitudes físicas que dieron lugar a la subdeterminación. Los modelos de bajo nivel, como el de Bohr, a pesar de que produzcan los mismos resultados de observación en determinados dominios, donde salvan sus apariencias, dejan de ser adecuados empíricamente cuando se amplía el alcance, allí donde los modelos justificados teóricamente son capaces de explicar y predecir perfectamente. Es decir, llega un momento donde el éxito de los modelos provisionales se detiene, y la subdeterminación empírica desaparece.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

La incompatibilidad de los modelos teóricos suele darse en regiones y fenómenos relativamente novedosos donde está dirigida la investigación de una determinada época. Los modelos “fenomenológicos”, como los llama Boniolo, son utilizados como una primera aproximación para organizar el material empírico a falta de una teoría, en el sentido fuerte del término, que unifique todo el contenido experimental. Entonces, efectivamente, los modelos se contradicen entre sí, y son de una validez parcial, limitada: su objetivo principal es salvar *determinadas* apariencias, y mientras unos funcionan para un determinado alcance, otros lo hacen en otros dominios. En el núcleo, por ejemplo, se da una incompatibilidad entre modelos colectivos y modelos microscópicos, puesto que parten de hipótesis contradictorias entre sí. Ante la imposibilidad de resolver analíticamente las ecuaciones, por el problema de los n cuerpos y por el exceso de grados de libertad para el número de ecuaciones y datos iniciales conocidos, los científicos optan por partir de un conjunto de suposiciones más o menos dispersas, con las que construyen mecanismos hipotéticos que no pretenden ser representaciones reales de lo que ocurre en la naturaleza.

Ahora bien, eso no nos permite extraer conclusiones definitivas sobre el método general de la ciencia, o sobre la “incognoscibilidad radical” de la naturaleza. La realidad no es accesible totalmente, ni lo será nunca, pero sí es accesible parcialmente a través de la medida, que constituye el comienzo y el fundamento de la representación científica. La naturaleza se deja representar, reconstruir, aunque determinadas leyes cuánticas produzcan tal asombro que lleguemos a pensar que no constituyen nada que se cumpla realmente en la naturaleza. Por otra parte, ningún estado de conocimiento particular permite proyectar consecuencias metodológicas para el futuro, y existen las mismas razones para pensar que, por ejemplo, no vaya nunca a existir una teoría sistemática para la representación de los fenómenos nucleares, como para creer lo contrario, igual que sucediera en Física Atómica. *Lo que sí que no puede discutirse es que los científicos trabajan para lograr semejante unificación*, de forma que todas las apariencias puedan ser deducidas a partir de una serie de principios teóricos, que sustituirían a las hipótesis provisionales con las que de momento se trabaja. Más aún, los modelos se mejoran, revisan y precisan, y las hipótesis con las que se construyen tratan de aproximarse todo lo que pueden al conjunto de enunciados teóricos que se consideran verdaderos para el resto de los fenómenos físicos. La ciencia no se conforma con distintas representaciones de validez limitada, e investiga cómo fundamentar de manera más amplia los

VIII. EL INSTRUMENTALISMO DE LOS MODELOS TEÓRICOS

modelos de bajo nivel que salvan determinadas apariencias, pero no todas. La Física Nuclear no está aislada del resto de las disciplinas físicas, y sus resultados son transferidos a otras áreas en un proceso de dependencia mutua, ya que las variables físicas implicadas en todos los casos, las dimensiones, son iguales en todos los dominios. El contexto de descubrimiento persigue la justificación teórica, una que vez que se ha logrado la justificación empírica. El uso de analogías, señalado convenientemente por los análisis de Boniolo, indica claramente que es un área novedosa de investigación puntera, donde no todas las suposiciones que forman los modelos radican en el mismo nivel de justificación: hay hipótesis preferibles a otras, y no es lo mismo considerar que no interviene la nube de electrones a despreciar las fuerzas electromagnéticas, igual que no da lo mismo hacer modelos de “bola de billar” a tratar de simplificar, justificadamente, la ecuación principal de Schrödinger: los errores implicados en cada caso son muy distintos, y el mismo cálculo predictivo se resiente de unas simplificaciones mucho más que de otras. Es decir, que hay niveles de fundamentación, una jerarquía de principios mediante la que el científico decide qué es lo importante y qué es lo accidental, a la hora de rechazar o escribir ecuaciones. El equilibrio entre los datos experimentales y la teoría es fundamental, con el fin de que ningún plano prime sobre el otro, y no se trate de calcular a toda costa perdiendo fundamentación teórica. Las dificultades que nos encontramos al modelizar determinados fenómenos son dificultades nuestras, técnicas, pero las limitaciones son limitadas porque se conocen, en principio, las leyes fundamentales que allí actúan. Preferentemente, se siguen las directrices teóricas; y cuando no se puede resolver nada, entonces se simplifica. Pero no todo da lo mismo.

También he defendido que los modelos, se sitúen donde se sitúen, no son ficciones, sino esquemas ideales de comportamiento, representaciones que sintetizan la información física general disponible para cada caso. En todo caso, existirían grados en la ficción, porque no es lo mismo hablar de un modelo de Universo de Einstein que de un modelo de Bohr donde los electrones “saltan”. La doble justificación, empírica y teórica, de los modelos, indicaría su grado de ficción.

Por último, he concluido esta investigación afirmando que la metodología científica es relativamente independiente de las epistemologías realista e instrumentalista, en el sentido de que hacer ciencia es construir modelos a partir de la suposición inicial de que la naturaleza es sistematizable. A favor del instrumentalismo, hay que decir que los modelos no son copias, ni reflejos, ni simulaciones, ni estructuras isomórficas o semejantes

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

con la realidad. Sin embargo, a favor del realismo hay que indicar que no todo vale, que la subdeterminación empírica desaparece al ampliar el alcance o al aumentar la precisión de la medida, y que las distintas reglas con las que medimos la realidad y nos hacemos un esquema de su comportamiento tienen una articulación interna que hace que el conocimiento no se amontone como si fuera un mero agregado de listas de hechos. Ambas epistemologías, a la hora de hacer ciencia, necesitan suponer, aunque sea transitoriamente, y desde el punto de vista lógico, la verdad de una serie de ecuaciones, con el fin de que actúen como premisas y sean capaces de derivar una serie de medidas, potenciales o efectivas. Mi tesis fundamental de que la relación que media entre la representación y la realidad es de síntesis trata de ser justo con ambas epistemologías, y se mantiene, hasta cierto punto, *neutral*. En último término, metodológicamente, he defendido que el modelo trata de *ajustarse empíricamente* a una serie de datos, al tiempo que también trata de ser todo lo *coherente* que puede con una serie de principios teóricos que la ciencia considera verdaderos.

CONCLUSIONES

Esta tesis doctoral ha defendido que *un modelo es una síntesis explicativa de un fenómeno construida por un científico a partir de una serie de enunciados teóricos y enunciados de observación considerados verdaderos [1]*. La palabra “síntesis” quiere indicar, contra el realismo, que la relación que media entre el modelo y la realidad no es la de un isomorfismo o similaridad, ni de copia, réplica, imitación, metáfora o cualquier otro tipo de “parecido” que establezca una correspondencia entre los elementos de la representación y los de la realidad. En nuestra crítica del isomorfismo y de la similaridad hemos comenzado indicando que la realidad no es una estructura algebraica de la que pudieran señalarse sus elementos y operaciones como si fuera un conjunto de números o un espacio vectorial. No hay un dominio característico de objetos al que llevar las flechas desde el conjunto inicial de nuestra representación. La representación abstrae los aspectos físicos del mundo y los unifica en un modelo a partir de una serie de medidas. Pero predicados como igualdad, semejanza, homotecia, isomorfismo, homomorfismo, etc., se dan entre representaciones, entre conjuntos perfectamente definidos sobre los cuales cabe hablar de correspondencias, aplicaciones y biyecciones.

La realidad no se puede definir extensionalmente, porque los objetos mediante los cuales sistematizamos la naturaleza en la representación pueden cambiar, y no son entes fijos para siempre sobre los que quepa preguntarse si nuestro modelo se realiza allí como estructura. En este sentido, ni la similaridad ni el isomorfismo, tal como se definen mediante predicados conjuntistas, son capaces de explicar por qué *una misma realidad física puede ser esquematizada de forma diferente [2]*, de forma que las distintas representaciones se refieran a un mismo fenómeno y resulten complementarias entre sí. Durante este trabajo he proporcionado ejemplos de distintas áreas de la Física donde la realidad no es sistematizable de una única manera: las reducciones entre sistemas de vectores, los teoremas de Teoría de Señales y Circuitos, que permiten la sustitución de sistemas complejos en sistemas más simples, los sistemas de dispersión en Física Nu-

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

clear, los modelos de epiciclo-deferente y excéntricas, o los modelos que reducen el número de partículas a una sola situada en su centro de masas, son ejemplos de representaciones donde varía el cardinal del conjunto y el número de relaciones definidas en el sistema, por lo que no habría un solo modelo isomórfico al mundo, sino infinitos, ninguno de los cuales sería más verdadero que los demás. Cuál se escoja dependerá de los datos iniciales que se conozcan y de la incógnita que haya que despejar. Estos modelos equivalentes permiten simplificar las ecuaciones y utilizarse conjuntamente entre sí, siendo de innumerables aplicaciones en todos los campos de la Física. Los sistemas son reemplazables y reducibles, sin que se cometa ningún tipo de error en el paso de unos a otros. Mi noción de síntesis no se pronuncia sobre cuál de todos estos sistemas es el verdadero.

Pero, además, *no cabe hablar de correspondencia exacta entre las predicciones de la representación y las medidas de la realidad* [3], ni siquiera en los casos más sencillos, donde los únicos indicadores que intervienen, por ejemplo, son la posición y la velocidad. La adecuación del modelo, su aceptabilidad empírica, es un más y un menos, y nunca resulta completa. El modelo une un conjunto de medidas o puntos discretos para hacerlos computables a partir de una fórmula, pero esa función nunca nos da una exactitud total, y su precisión siempre es relativa a una tolerancia y error que permite un científico. Incluso en el caso de que supongamos que es posible acercarse a una réplica exacta de la fórmula del mundo, tal como se diera objetivamente en la realidad, *tal isomorfismo no sería comprobable* [4], pues existe una serie de puntos donde la naturaleza resulta inaccesible y donde no puede efectuarse ningún tipo de medidas.

También he calificado, en contra de la mayoría de las opiniones de la Filosofía actual de la Ciencia, la similaridad como una relación que supone el isomorfismo, y que de ningún modo rebaja su carga ontológica. *La similaridad es un isomorfismo camuflado* [5], porque lo único en que se parecen nuestra representación y la realidad es en el mayor o menor ajuste con que el modelo subsume la serie de medidas que forman el *explanandum*. La comparación es únicamente entre números, entre predicciones y datos de observación; no se comparan estructuras de forma global. Decir que nuestro modelo es similar al mundo es lo mismo que decir que “salva las apariencias”; la similaridad es reducible al grado de aceptabilidad o utilidad del modelo, y lo único que hace es suponer que toda explicación, todo modelo teórico, es mejorable, y se va “pareciendo” a la estructura real del mundo según aumenta el detalle y la resolución.

CONCLUSIONES

Por estas razones, me opongo a la definición extensional de la teoría como la clase de modelos donde se realiza, por muy informal que sea la axiomatización, y a la pretensión de que una teoría sea capaz de dar un listado de sus modelos, realizaciones, aplicaciones, analogías o grados de similaridad (que no son más que errores estadísticos de aciertos y desaciertos). En su lugar, defiendo que el modelo es una representación, de carácter lingüístico, como reconstrucción ordenada de la serie de medidas con las que experimentamos la realidad y como la expresión más breve y exacta de un fenómeno que permite establecer una serie de cálculos deductivos. El modelo es entonces una reconstrucción racional del fenómeno, un principio explicativo de la realidad observable, una abstracción, algo que permite que nos formemos una idea de lo que ocurre en la naturaleza.

La palabra síntesis quiere indicar también, contra el instrumentalismo, que *un modelo no es una ficción, y que va más allá del mero resumen de los datos empíricos que se disponen* [6]: constituye un conjunto de ecuaciones que suministran toda la información disponible de un determinado fenómeno hasta la fecha, y permite realizar una serie de predicciones potencialmente comprobables según el nivel técnico y resolutivo de la ciencia en una determinada época. Los modelos constituyen la forma de la realidad, su esencia, aunque esa esencia quede siempre referida a nosotros y en ningún momento trate de suplantar, imitar o compararse con la realidad. Se trata, en definitiva, de hacerse una idea del original, del mundo, pero no por eso los esquemas científicos van a constituir una ficción, en el sentido de ser algo irreal o imaginado.

El adjetivo “explicativa”, añadido al sustantivo “síntesis”, se refiere a que *el modelo, básicamente, es un explanans cuya mayor o menor utilidad radica en su capacidad para deducir, subsumir o calcular una serie de enunciados que forman el explanandum, y que van, desde datos empíricos o medidas hasta teorías, pasando por leyes, hipótesis y otros modelos de distinto nivel de generalidad* [7]. La explicación es una fundamentación, una justificación deductiva, una demostración. El modelo proporciona las ecuaciones necesarias para inferir un enunciado considerado verdadero, y entonces se dice que es adecuado o inadecuado, antes que verdadero o falso, con relación a su capacidad o incapacidad para deducir ese enunciado para el que se busca una explicación.

Tanto realistas como instrumentalistas, a la hora de calcular, necesitan suponer la verdad de ciertos enunciados con el fin de que actúen como premisas dentro de un ar-

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

gumento lógico, sin importar el nivel del lenguaje donde se sitúen. Cabe hablar entonces de cierta *equivalencia metodológica entre considerar que las leyes son verdades de un sistema teórico o considerar que son reglas de inferencia para deducir teoremas y resultados de observación* [8]. Lo que importa de una ecuación, a la hora de deducir, es su utilización como premisa dentro de un *explanans* al que se supone, aunque sea momentáneamente, como verdadero, con el fin de desarrollar pautas deductivas en busca de nuevas teoremas y enunciados de observación. Sin embargo, admito, a favor del instrumentalismo, que en Física no interesa tanto destacar la verdad de las leyes, cuanto su poder argumentativo y predictivo. La verdad, en ciencia, es un “tener por verdadero”, una convención; pero la verdad también es una cuestión de precisión, y creer en la verdad de un enunciado, hasta que no se demuestre lo contrario, significa creer en su precisión. Las leyes científicas, ya sean consideradas como verdades aproximadas, ya sean consideradas como reglas de inferencia, no son verdades necesarias, y pueden ser precisadas y revisadas.

Desde el punto de vista operativo, el modelo es una descripción ideal de un fenómeno, al que se define de acuerdo con una serie de indicadores que caracterizan los estados de un sistema vinculados entre sí mediante reglas, algoritmos o fórmulas matemáticas. Estos indicadores son variables que representan cantidades físicas fundamentales, como la masa, el espacio, el tiempo, la carga, la energía, el momento angular, la temperatura, etc., que en todo momento tienen asegurada su referencia física a través de la experiencia, y que permiten escapar de cualquier tipo de relativismo o “inconmensurabilidad” que impida la comparación racional de teorías o hipótesis sobre unas bases estrictamente objetivas, sin que sea necesario hacer referencia a “cambios de mundo” o esquemas conceptuales previos.

Uno de los objetivos de esta tesis doctoral ha sido asegurar el balance predictivo entre teorías y modelos mediante el rechazo de un lenguaje subjetivo que dividiera los términos científicos en “observables” y “teóricos”, como si algunos de estos términos fueran más empíricos o abstractos que los demás, y necesitaran algún tipo de aclaración o definición que los pusiera en correspondencia con la realidad. Pero en una ecuación nada los diferencia entre sí, y ninguno es más fundamental, abstracto o empírico que los demás, aunque a partir de una combinación de ellos puedan caracterizarse dimensionalmente los demás. Pero lo fundamental y lo derivado sólo menciona los datos conocidos o condiciones iniciales, y los datos que se desean conocer en función de los demás,

CONCLUSIONES

o incógnitas. Es decir, que la distinción entre lo primitivo y derivado es relativa al problema que se desea resolver, y no absoluta.

Debemos convenir, con el positivismo de Mach, que la realidad física es la medida de una experiencia, de una sensación, y que la mayor o menor presencia de ciertas magnitudes físicas es lo que constituye la medida (el número) de esa experiencia para un observador, que se encarga de registrar aquello que siente y experimenta. Los enunciados de observación asignan un valor concreto, seguido de unidades, a cierta dimensión física, y se sitúan por fuera de todo tipo de “carga teórica” que las haga relativas a tal o cual teoría e impida su utilización universal como condiciones iniciales para la resolución de los problemas. Así, la aceleración de la gravedad a nivel del mar, el radio o la masa de la Tierra, la constante de Boltzman, la longitud de onda Compton del electrón, etc., no forman parte del contenido de ninguna teoría en particular, aunque pueden ser precisadas de acuerdo con los avances teóricos, matemáticos e instrumentales.

Mi apuesta por una *lenguaje fiscalista basado en el análisis dimensional, como lenguaje común de observación que garantiza la universalidad e intersubjetividad de los enunciados de observación considerados verdaderos [9]*, supone, además, que las leyes e hipótesis científicas, aunque pertenezcan a teorías diferentes, hablan acerca de lo mismo, sobre aquello que sentimos bajo ciertas condiciones experimentales. Las magnitudes físicas no son entonces ningún “reflejo” de lo real, como pensaba Duhem, sino una medida de lo real, lo cual es muy diferente. Mi conclusión es que los términos científicos no pueden definirse analíticamente, ni siquiera de modo parcial, como suponía el positivismo lógico. Una teoría no se pone a definir “analíticamente” lo que la masa o la velocidad “es”; eso ya se conoce. Lo que se define, siempre operacionalmente, son las unidades, como forma de especificar una serie de procedimientos experimentales que permitan obtener una experiencia de cierta cantidad de una dimensión, a la que posteriormente se referirán las medidas.

Dados dos estados del sistema, caracterizados por unos indicadores determinados, la representación supone que hay una operación o “mecanismo” que permite calcular un estado en función de otro. El fenómeno es representado mediante su secuencia ordenada de estados, en lo que constituye su trayectoria en un espacio n-dimensional, de acuerdo al número de magnitudes físicas con los que quedó caracterizado. La predicción es posible porque antes se ha descrito el fenómeno mediante una serie de ecuaciones que esquematizan su comportamiento básico a partir de una serie de medidas. Además, la re-

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

presentación supone un causalismo entre dimensiones, es decir, que el aumento y la disminución de la presencia de una dimensión producen un incremento proporcional en otra, que es lo que se refleja matemáticamente en una ecuación. Igual de causales son, en este sentido que he defendido, tanto un modelo de Ptolomeo como otro de Einstein. Dentro de una ecuación no se distinguen las causas y los efectos, y son relativos a los primeros incrementos que se producen y que hacen reaccionar las otras dimensiones. El fundamento de la medida es esta interacción mutua entre dimensiones, de manera que un aparato de medida proporciona una respuesta cuantificada a un estímulo previo, sin que exista ninguna diferencia entre “ver directamente” y “ver a través de un instrumento”. Así, contra Hacking y Cartwright, defiende que no es necesario añadir ningún causalismo a las leyes científicas; y contra van Fraassen y Carnap, afirmo que no hay ninguna diferencia entre lo observable y lo “inobservable” que se base en los aparatos de medición.

En otro orden de cosas, he afirmado que *las teorías científicas, por sí solas, no son realistas o instrumentalistas* [10], antes de su interpretación epistemológica. Las teorías son diferentes maneras de medir la realidad, distintas formas de cuantificar e interpretar los fenómenos. Cada una de ellas impone su configuración característica (su espacio-fase, en terminología semántica) para los estados permitidos y prohibidos de cosas. Sin embargo, hay un método general de representación común a todas las teorías, por muy complicadas, avanzadas o “indeterministas” que nos parezcan, que actúa como regla metodológica fundamental y que no puede ser analizada por ninguna de ellas en particular. La representación supone que la naturaleza es reducible a un esquema de comportamiento básico o sistema a partir del cual puede determinarse el valor de ciertos indicadores característicos. El debate filosófico sobre la posibilidad de una estructura última de la realidad, a la cual nos acercaríamos gradualmente, no es reducible a un debate científico en el que la ciencia tratara de modelizar su fundamento. La ciencia no puede hablar de sí misma utilizando sus modelos, y ninguna teoría, como la de la evolución de Darwin o la Mecánica Cuántica, apoya el instrumentalismo o el realismo. Más aún, quien apoyara el instrumentalismo basándose en una teoría en particular estaría siendo, en último término, realista.

Para construir un modelo se necesita una serie de enunciados teóricos. Estos pueden ser proporcionados directamente a partir de una teoría, o pueden ser hipótesis de menor alcance, de bajo nivel, como forma provisional de salvar las apariencias a la es-

CONCLUSIONES

pera de una justificación posterior que derive directamente el modelo del principio de enunciados teóricos que la ciencia considera verdaderos. Nuestra investigación ha partido de una serie de ejemplos astronómicos donde se persigue subsumir una serie de medidas de acuerdo a un patrón matemático que haga parecer como razonable lo que en principio escapa al control lógico. El llamado “problema de Platón” persigue reducir los fenómenos a unidades mínimas de computación, de manera que sea posible generar los datos que se disponen en tablas empíricas; en este caso, las posiciones de los planetas. Cuando un modelo de datos genera, siempre aproximadamente, el conjunto de medidas para el que se buscaba una explicación, el modelo “salva las apariencias”, porque es capaz de proporcionar un algoritmo que computa la serie de datos disponibles dentro de un margen de error. El modelo no es verdadero o falso, sino más o menos adecuado, o mejor, más o menos acertado, según su capacidad para deducir y generar las medidas, y de acuerdo con la tolerancia de error que permite el científico, dentro de una precisión que él considera aceptable, dependiendo de los órdenes de magnitud donde se mueva.

Pero el modelo, llegados a este punto, hace mucho más que resumir la información disponible hasta el momento. Como esencialmente es una función matemática, que arroja una serie de valores en función de una variable independiente, predice toda una serie de nuevas medidas, algunas de las cuales podrán ser comprobadas por la ciencia, de acuerdo a sus capacidades técnicas y a la precisión de la medida de la época que consideremos. La calidad del modelo, su verdadera utilidad, está en esa serie de predicciones que permiten al científico adelantarse al comportamiento del fenómeno y obtener cierto control sobre el mismo. En el modelo de caída libre que hemos analizado, la ecuación de Galileo permite predecir infinitas alturas para infinitos tiempos, yendo mucho más allá de la serie de medidas iniciales que motivaron la construcción del modelo. Aquí radica la efectividad de un modelo, su carácter instrumental, en la apuesta por las nuevas predicciones que las ecuaciones son capaces de calcular. Si la ciencia comprueba que una serie finita de medidas predichas por el modelo se ajusta, hasta cierto punto, a la serie de medidas efectivas sobre la realidad que se realizan para comprobar su funcionamiento, entonces el modelo sigue explicando en otros lugares distintos a aquellos para los que inicialmente había sido construido, salvando otra serie de nuevas apariencias.

Así, concluyo que *la utilidad del modelo radica en su eficacia computacional a la hora generar medidas, ya sean reales o posibles* [11]. En el primer caso, cuando la

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

ciencia cuenta con las medidas, hablamos de explicación, en el sentido de salvar las apariencias; en el segundo, de predicción. Descripción, predicción y explicación van de la mano, y en una ecuación no se diferencian entre sí: depende de lo que ya se conozca, de los datos iniciales, y de las incógnitas que se desean calcular. El modelo, efectivamente, es una descripción a partir de la cual se pretende predecir y explicar: esto es lo que entiendo por una síntesis.

Pero un modelo teórico de datos, meramente empírico, que se dedica a generar y subsumir medidas, no sólo se construye a partir de una serie de hipótesis de bajo nivel más o menos justificadas. El modelo también puede ser deducido directamente a partir de una teoría que proporciona las reglas metodológicas básicas para representar el modelo. En este caso, el modelo, si la teoría es considerada como verdadera, está justificado no sólo empírica, sino teóricamente, por lo que su fundamentación es mayor que si partiera de una serie de hipótesis aisladas. Mi elección de un modelo teórico de Mecánica Clásica, derivado directamente de las tres leyes de Newton, más una serie de suposiciones y simplificaciones sobre la naturaleza física de los cuerpos, creo que resulta lo suficientemente ilustrativo como para no separar el proceso de modelización científica del proceso de teorización de la naturaleza, pues entiendo que no son cosas distintas. Al final, a través de un descenso desde los principios teóricos más generales, hemos obtenido las ecuaciones de un proyectil en función de su latitud y velocidad inicial, consiguiendo la misma eficacia empírica y computacional que en el caso de los modelos astronómicos, sólo que con una justificación mayor, porque las ecuaciones han sido deducidas en el marco de una teoría a la que se consideraba verdadera.

Por supuesto, la teoría no soluciona todos los problemas. Un sistema de ecuaciones puede ser algo muy difícil de resolver, dependiendo de los grados de libertad que admita y de su complejidad matemática, hasta el punto de no admitir una solución analítica y tener que ser resuelta mediante técnicas de aproximación. La teoría no proporciona algo así como un procedimiento mecánico para obtener modelos de todos los fenómenos posibles. La resolución de los problemas, efectivamente, no es inmediata, porque *la serie de suposiciones, simplificaciones, correcciones e hipótesis con las que se consigue derivar el modelo teórico no puede ser axiomatizada dentro de la teoría como si formara parte de un cálculo lógico interpretado* [12]. En uno de los errores fundamentales del positivismo lógico, se pretendió reducir un sistema físico a un sistema formal como si el conjunto de leyes científicas pudiera ser derivado estrictamente a partir de

CONCLUSIONES

una serie de reglas de inferencia o transformación, igual que se obtienen las tesis y verdades de un sistema lógico. Pero creo haber defendido convenientemente que un sistema axiomático, por muy interpretado que esté, es algo demasiado rígido como para derivar la gran mayoría de los enunciados teóricos que la ciencia, en un determinado momento, considera verdaderos.

He puesto el ejemplo de la ley de Laplace, en Termodinámica, como ejemplo de ley considerada verdadera que no puede ser concluida a partir de la ecuación fundamental de la conducción del calor a no ser que se realicen suposiciones físicas que indiquen que no hay variación de la temperatura, ni generación de calor interior, o que la conductividad térmica permanezca constante. Un sistema lógico basado en las combinaciones algebraicas de las leyes fundamentales no avanzaría lo más mínimo hacia el conjunto de leyes más o menos válidas en la mayoría de las situaciones a las que los científicos se enfrentan. He concluido que la semántica, basada en la interpretación de los símbolos no lógicos de un lenguaje formal, no recoge el fundamento de las teorías científicas, y ninguna traducción a este tipo de lenguajes va a decir más de lo que dice una ecuación diferencial por sí sola, cuya expresión está reducido al mínimo y ya resulta lo suficientemente explícita.

Pero mi crítica va todavía más allá del reduccionismo lógico y apunta también al reduccionismo matemático cuando afirmo que *ninguna de las aproximaciones y simplificaciones con las que se obtiene las ecuaciones que modelizan un fenómeno particular se basan en la teoría de límites matemáticos o sucesiones* [13]. Cuando un científico desprecia las fuerzas que ejercerían otros planetas, las interacciones de la nube de electrones, o cuando considera que la Tierra es una esfera homogénea y que su velocidad de rotación es constante, no interviene para nada el símbolo “ \rightarrow ”, que indica una tendencia o un límite matemático, sino el símbolo “ \approx ” ó “ \cong ”, que en cualquier caso quiere decir que existe una buena aproximación en relación con los órdenes de magnitud que se están considerando, según la naturaleza del fenómeno que se estudie. Una cosa no tiene nada que ver con la otra, por mucho que queramos ver algún tipo de parecido, y lo único que muestra es una de las grandes diferencias que existen entre la Física y la Matemática, porque no es lo mismo realizar suposiciones físicas sobre los cuerpos que despreciar un infinitesimal frente a otro; en el primer caso, hay un error, que será más o menos soportable por la totalidad del sistema, según la precisión que se considere aceptable. Las simplificaciones, en Física, están más o menos justificadas, y no todas las suposi-

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

ciones arrastran el mismo error ni están igual de fundamentadas. No es lo mismo suponer que la temperatura y el número de moles permanecen constantes, con el fin de aplicar la ecuación de Boyle-Mariotte, que despreciar en el interior del núcleo las fuerzas electromagnéticas, o igualar a cero la constante de Planck. En el primer caso, el científico puede diseñar un experimento que se acerque todo lo posible a las condiciones en las que tiene sentido la ley; en el segundo, se arrastra un error que puede llegar a ser considerable en función de la precisión que el científico admita; en el tercero, se comete un error muy grave que hace desaparecer de pronto toda la Mecánica Cuántica. He criticado los llamados “límites clásicos” entre teorías porque las constantes físicas fundamentales, como la velocidad de la luz, no tienden a nada que no sea el valor que tienen, y siempre están presentes, aunque no se detecten en determinados órdenes de magnitud.

Lo interesante, en cualquier caso, es *lograr un equilibrio entre la fundamentación teórica y el cálculo predictivo* [14], de manera que no seamos tan rigurosos teóricamente como para no poder calcular nada, y que tampoco, con el afán de calcular, cometamos una serie de errores graves que se van a notar a la hora de comparar las predicciones del modelo con los datos experimentales. Ningún plano, ni el empírico ni el teórico, debe dominar sobre el otro: ni el modelo puede tener en cuenta “todo”, ni tampoco puede ser construido con la vista puesta solamente en el cálculo, como si la ciencia fuera un caos donde las hipótesis pudieran escogerse arbitrariamente y con toda la libertad del mundo. “Salvar las apariencias” no es una tarea fácil.

Mi defensa de otras de las tesis fundamentales de esta investigación, como es la *doble justificación, empírica y teórica, del modelo* [15], tiene como objetivo limitar esta arbitrariedad a la hora de escoger las premisas con las que se construye el modelo y hacer justicia a los fundamentos metodológicos de la ciencia. Con la afirmación de que el modelo, dada una información disponible, teórica y observacional, lo que hace es sintetizar el comportamiento del fenómeno, quiero dar a entender, sencillamente, que el modelo trata de ajustarse empíricamente a una serie de datos disponibles, al tiempo que trata de ser todo lo coherente que puede con una serie de principios generales teóricos considerados verdaderos. O de otra manera: el científico tiene que decidir, de entre todos los principios posibles, aquellos que, estando más justificados teóricamente, sean capaces de construir modelos que salven las apariencias. Esta afirmación reduce el debate entre realistas e instrumentalistas a un problema de fundamentación, en el sentido

CONCLUSIONES

de que podamos preguntarnos: “a igualdad de eficiencia empírica, ¿a partir de qué premisa queda lo suficientemente justificado un modelo?”

Pero esto nos lleva a un análisis interno de las teorías, con el fin de averiguar cómo se estructuran dentro de la red teórica, y de qué forma permiten derivar, con diferentes grados de abstracción, generalidad y fundamentación, los distintos modelos utilizados para representar los fenómenos. En este sentido, aceptar que el conjunto de suposiciones y aproximaciones que un científico utiliza para simplificar las ecuaciones no pueda formar parte de ningún cálculo no significa aceptar que no haya una deducción lógica entre las diferentes leyes de manera que una serie de enunciados constituya el fundamento de las demás. Hay modelos más abstractos y más justificados que otros, dependiendo de las teorías, leyes o hipótesis que lo construyan. No es lo mismo un modelo de Einstein del Universo que un modelo del núcleo que no utiliza la ecuación de Schrödinger. El grado de fundamentación varía, y con él la confianza que en él deposita un científico, aunque esta creencia, contra el empirismo bayesiano, no pueda expresarse con un número.

Los enunciados teóricos son el fundamento del modelo, hasta el punto de que se lo denomina con relación a los principios teóricos que se han utilizado para su construcción. Así, hablamos de modelos relativistas, de modelos mecánicos, electromagnéticos o cuánticos, sin que se aluda en ningún momento al grado de generalidad o abstracción que tienen. Mi noción de modelo es amplia, como corresponde al lenguaje de la Física, e incluye no sólo fórmulas empíricas o modelos de datos, sino, por ejemplo, modelos termodinámicos abstractos. He señalado que *el mayor o nivel grado de abstracción tiene que ver con el alcance, y no se refiere a su mayor o menor contacto con la realidad* [16]. Todas las leyes son ecuaciones que ligan matemáticamente las mismas dimensiones físicas, por lo que no tiene ningún sentido distinguir entre leyes fenomenológicas y leyes fundamentales, según su mayor o menor contacto con la realidad. Todas las leyes y modelos, por muy abstractos y fundamentales que sean, y por muchas simplificaciones que necesiten para resultar operativas, se refieren, directamente, a la realidad, porque utilizan los mismos términos y operaciones que las de bajo nivel. La única diferencia reside en su alcance, que es mucho mayor en las primeras. Además, todas ellas describen, explican y predicen, y quieren ser universales, aunque dentro de un dominio, justamente aquel que señala su antecedente, por lo que las cláusulas *ceteris paribus* son completamente innecesarias.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Debemos rechazar la existencia de componentes extraños en el seno de las teorías, como los “componentes metafísicos y ontológicos” de Duhem, las “entidades inobservables” de van Fraassen, o las “estructuras analíticas lógico-matemáticas” que superdeterminarían el contenido empírico de la teoría. Nadie ha sido capaz de proporcionar un criterio que permita separar lo observable de lo inobservable, y la distinción no aparece en ningún texto científico. He señalado que lo observable es lo experimentable, lo que puede sentirse, medirse y registrarse, y que la vista no puede ser el árbitro entre lo que puede observarse y lo que no, porque una medida puede cuantificarse por distintos sentidos. Tampoco los límites de nuestra percepción pueden erigirse en garantía de lo observable, pues no hay mayor fiabilidad en los sentidos humanos que en los aparatos de medición, y dudo mucho que la Biología o Física “últimas” se dediquen en algún momento a especificar criterios sobre lo inobservable. Lo que rechazo, en último término, es que la teoría llegue en algún momento a pronunciarse sobre lo “inobservable”, puesto que este adjetivo no tiene ningún sentido para la ciencia, que trata directamente con lo observable (en el sentido de detectable), mientras que todo lo demás ni siquiera “es”.

Todos los conceptos que aparecen en una teoría tienen un significado empírico directo [17]. La referencia de las dimensiones, o cantidades físicas fundamentales, queda asegurada por la experiencia y el análisis dimensional. Para casos de ecuaciones, operaciones o funciones, no tiene ningún sentido los predicados “real” u “observable”. Las idealizaciones, como palanca o péndulo ideal, no son más que un conjunto de ecuaciones a las que no se han aplicado condiciones iniciales para que su alcance sea máximo; y, en todo caso, son abstracciones que resaltan lo fundamental de la realidad, sin que dejen de referirse en ningún momento a la física de los cuerpos. En cuanto a los objetos físicos propiamente dichos, como electrones, átomos, moléculas o muones, afirmo que no hay ninguna diferencia entre representar una silla o representar un quark: son un conjunto de ecuaciones más una serie de condiciones iniciales que especifican el valor concreto de alguna de sus dimensiones. Es decir, que se da el mismo método en uno y otro caso, aunque los órdenes de magnitud sean distintos. Los objetos, en Física, son modelos, representaciones o sistemas, y dentro de un sistema más amplio son esquematizables de distinta manera. Lo estrictamente real son las dimensiones, las magnitudes físicas, a las que la representación supone un sustrato al que pone un nombre como resumen de las propiedades que se le adscriben. Los objetos podrán existir o no; pero no son, de entrada, “inobservables”; todo lo contrario, para el caso, por ejemplo, de las

CONCLUSIONES

partículas elementales, se supone su existencia y se buscan confirmaciones a través de los efectos que causaría. Si las causas que motivaron su postulación como objeto quedan explicadas de otra manera, ni siquiera entonces se le considera “inobservable”, sino simplemente “no existente”, como ocurrió con el planeta Vulcano.

Respecto de la posibilidad de que la Matemática superdeterminara a la Física, he señalado que la arbitrariedad de las hipótesis matemáticas con las que se construye el modelo tiene un límite, y que la representación impone una serie de condicionantes físicos a la función que modeliza una serie de datos, como es su continuidad y diferenciabilidad. La Matemática es esencial, porque las leyes físicas son básicamente relaciones de proporción, y tan matemático es un modelo de Aristóteles como uno de Ptolomeo o Einstein; pero la Física discrimina, de entre las soluciones posibles de una ecuación, aquellas que tienen un significado físico, como a la hora de interpretar la función de onda, por lo que más que hablar de superdeterminación cabe hacerlo de subordinación.

En conclusión, *las partes explicativa, descriptiva, teórica, empírica, matemática, observable, etc., no son componentes separables dentro de la teoría [18]*. Cuando los conceptos sobran, como el espacio y tiempos absolutos de Newton, el éter o el calórico, la propia ciencia se encarga de depurarlos.

La teoría, una vez que la hemos despejado de todos los elementos ontológicos extraños, puede ser considerada como una especie de “rutinas” y “subrutinas” terminadas a disposición del científico, que las utiliza cuando lo cree conveniente. La serie de derivaciones mediante las cuales se van obteniendo los distintos teoremas y modelos parte de unos principios a los que se considera máximamente verdaderos, en el sentido de que su función de verdad (=1) recorre deductivamente el cuerpo teórico hasta alcanzar las leyes de menor nivel con las que finalmente se procede a calcular, ya sea para predecir, ya sea para explicar. Existe, por lo tanto, una jerarquía deductiva mediante la cual la teoría va especificando sus alcances en el desarrollo de los modelos típicos, que pretenden resolver los casos más comunes con los que se enfrenta el científico. La ciencia parte de unos enunciados teóricos aceptados como verdaderos que potencialmente figurarían como premisa en todas las demostraciones. Pero no es necesario que el científico derive las ecuaciones cada vez que modeliza un fenómeno. La ciencia cuenta con la verdad de ciertos modelos que ya han sido deducidos y justificados, y con los que trata de reducir los problemas que surjan a problemas ya conocidos. Se trata, en definitiva, de aplicar las ecuaciones más generales a los casos más particulares, complicando o corrigiendo,

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

cuando sea necesario, los modelos básicos, y analizando la realidad en esquemas básicos de comportamiento, como quería Platón.

Evidentemente, el grado de convencionalismo se asocia, como pensaba Poincaré, al mayor o menor grado de provisionalidad de los enunciados. *La convención es mayor para los pilares teóricos que la ciencia considera verdaderos, y menor para las leyes de bajo nivel que son las que, en caso de corrección, revisión o mejora, primero se ofrecen a la falsación [19].* Distingo entre leyes e hipótesis atendiendo a la diferencia en el grado de convencionalismo; ambas son transitorias, lo que indica que el componente convencional de la ciencia, aunque muy fuerte, está limitado, y cualquier teoría o ley puede, en principio, caer. Un conjunto de hipótesis provisionales, que originalmente salvaban las apariencias en un determinado dominio, puede aumentar su alcance y dirigirse hasta los principios teóricos fundamentales mediante los que la ciencia, hasta entonces, deducía sus modelos. En este caso se daría una reinterpretación de todo lo ya conocido de acuerdo a una serie de reglas metodológicas diferentes, mientras que las leyes anteriores quedarían como aproximaciones o instrumentos más o menos útiles.

Ahora bien, admitir que las leyes puedan precisarse, exactamente igual que se precisan los enunciados de observación, no significa exagerar la provisionalidad de los principios teóricos que sustentan todo el edificio científico. Un desacierto en un determinado dominio no va a hacer caer el conjunto de una teoría, como si todos los enunciados teóricos tuvieran el mismo valor. Los modelos se retocan lo justo para que vuelvan a funcionar, sin que se insista más en la falsación, porque eso significaría que buena parte de otros fenómenos, modelizados a partir de esos mismos principios que ahora se ponen en duda, se quedarán sin explicación de buenas a primeras, produciendo un “vacío empírico”. Además, la falsedad tiene los mismos problemas que la verdad, y tampoco es para siempre. Las leyes no son estrictamente verdaderas, pero tampoco falsas; son más o menos útiles y aproximadas. *Falso, en ciencia, significa: no lo suficientemente preciso [20].*

El convencionalismo moderado por el que abogo explica con facilidad el uso frecuente que los científicos hacen de la palabra “confirmación” o “verificación”, sin que ello signifique que los enunciados empíricos sean verificables mediante procedimientos mecánicos, o que la confirmación amplíe la medida de confianza subjetiva que un científico muestra en las hipótesis a la luz de las evidencias. Confirmar una teoría significa que, habiéndola supuesta como verdadera, ha mostrado su eficacia una vez más. Lo que

CONCLUSIONES

se confirma o se verifica es el valor de verdad que se ha supuesto. Con ello destaco algo que frecuentemente se olvida, y es el hecho de que la ciencia tiene una explicación para la gran mayoría de los fenómenos.

La ciencia cuenta con la verdad de ciertos enunciados teóricos, los más generales de todos, a los que considera su mayor conquista. La incompatibilidad radica entonces, sobre todo, en los modelos de más bajo nivel, aquellos que han sido construidos para salvar las apariencias en áreas relativamente novedosas para las que se está buscando una explicación. El uso de hipótesis provisionales no es algo normal, y sólo se efectúa cuando no hay más remedio, por la necesidad imperiosa de predecir y calcular. Los modelos nucleares de la actualidad, construidos a partir de diferentes hipótesis, son un buen ejemplo de modelos limitados que son válidos para determinados dominios mientras que fracasan estrepitosamente en otros. Las hipótesis que construyen el modelo se toman de diferentes disciplinas, estableciéndose analogías con otros sistemas conocidos y admitiendo suposiciones que permitan simplificar los grados de libertad del sistema de ecuaciones. *El método científico no sólo consiste en justificar deductivamente, sino en la investigación de los nuevos fenómenos mediante modelos de bajo nivel, que salven las apariencias y permitan el cálculo predictivo [21].*

Ahora bien, en este caso de la Física Nuclear, ni todas las hipótesis están igual de justificadas, ni los científicos se conforman con la convivencia pacífica de las contradicciones: los modelos se precisan y mejoran, y se trabaja para lograr la unificación sistemática a partir de una teoría. El uso de las analogías nos muestra que estamos dentro del contexto de descubrimiento, y que, entre cosas, se investiga sobre los límites y el alcance de estos modelos teóricos. Como he destacado en el estudio de los sistemas vibratorios, las analogías, aunque no deben formar parte de las teorías, y nunca se den entre la representación y la realidad, sino entre representaciones, lo que buscan es una identidad formal de las ecuaciones a partir de la correspondencia de los términos y tablas de equivalencia formal, de modo que distintos sistemas físicos obedezcan a las mismas ecuaciones, cuya resolución y análisis se aplicaría a todos los casos. Pero con esto se persigue, justamente, la unificación del contenido empírico en fórmulas más generales.

Igual que ocurre en la Matemática, donde una proposición no forma parte del conocimiento real hasta que no es demostrada a partir de principios superiores, también en Física un modelo que se limite a salvar las apariencias no es almacenado en el *stock*

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

justificado de modelos hasta que no es deducido rigurosamente a partir de los principios teóricos más abstractos. En el caso de las revoluciones científicas, cuando los principios de bajo nivel ascienden hasta ocupar el lugar de los grandes pilares científicos, sólo cuando la teoría se completa se ven justificados los modelos construidos mediante hipótesis provisionales. Mientras tanto, los científicos teóricos se afanan en conservar el mayor número de leyes consideradas verdaderas, con el fin de mantener toda la información que las antiguas ecuaciones sintetizaban acerca de los fenómenos. El objetivo fundamental de toda revolución científica habría sido, precisamente, reunificar el conocimiento anterior a partir del nuevo, sistematizar lo ya conocido a partir de las nuevas informaciones que se van conociendo.

La ciencia trabaja para solucionar las contradicciones porque no hay ninguna razón para dividir ontológicamente el Universo en departamentos estancos o episodios físicos condenados a tener las mismas leyes para siempre. La unificación es una exigencia metodológica de la representación científica basada en que los aspectos físicos complementarios de la realidad, las dimensiones, están presentes en todas partes. No tiene sentido dividir la naturaleza en reinos donde valdrían leyes diferentes e incompatibles según el orden de magnitud, porque eso significaría aislar las ramas de la Física, cuando lo cierto es que las investigaciones en los distintos dominios se complementan e influyen entre sí. *La subdeterminación empírica*, el hecho de que hipótesis incompatibles produzcan el mismo balance empírico, se da en dominios muy restringidos, y *desaparece al ampliar el alcance o al mejorar la precisión de las medidas* [22]. Modelos como el de Bohr o de Sommerfeld subdeterminan empíricamente casos muy aislados, y su éxito o aceptabilidad empírica se detiene allí donde la teoría completa sigue salvando las apariencias. Concluyo entonces que los modelos provisionales salvan “determinadas” apariencias, no todas, y que su relativo éxito y fracaso queda explicado en el marco de una teoría sistemática de mayor alcance.

Concibo el progreso científico como un *doble proceso de sistematización de la realidad mediante la diversificación y unificación que articula el conocimiento, y no lo amontona en una lista de hechos* [23], al tiempo que subrayo el papel decisivo de las leyes fundamentales en la investigación, en Partículas Elementales, por ejemplo, cuando se parte de la verdad de ciertos enunciados teóricos generales y se postula un subsistema o partícula de modo que las leyes fundamentales vuelvan a ser “verdaderas” en caso de que no se cumplan. La síntesis no es sólo de datos, sino también de leyes, y una ley fun-

CONCLUSIONES

damental que sintetiza otras de menor nivel hace mucho más que resumir su contenido empírico: va más allá y predice nuevos resultados, que permiten avanzar en la investigación de nuevos campos, al tiempo que unifican y articulan el conocimiento.

Como conclusión general de esta tesis doctoral, afirmo que *la verdad es una cuestión de precisión* [24]. Dado un fenómeno, siempre hay una mejor explicación, en el sentido de “más precisa”. Nuestra experiencia del mundo, aunque nunca llegue a completarse, puede hacerse más precisa. Esto supone relativizar el concepto de verdad científica al nivel de resolución o precisión de la medida que una comunidad científica, en una determinada época, dispone. El progreso teórico no puede separarse del progreso experimental, porque la ciencia es tanto “más verdadera” cuanto más allá es capaz de “ver”. La medida tiene un límite, determinada por la sensibilidad de los sensores. El aumento de esta sensibilidad no sólo depende de la mejora técnica de los instrumentos de medida, sino que implica avances teóricos, matemáticos y experimentales. Es el aumento en el detalle, en definitiva, lo que permite precisar, y, en su caso, reinterpretar, los modelos anteriores a partir de una nueva síntesis que incorpore las nuevas informaciones.

Nuestros modelos se articulan y ordenan dentro del sistema de la ciencia. Pero sólo son reglas de medir la realidad, y nunca encajan en ella. La comparación sólo se establece entre predicciones y medidas, no entre estructuras globales: “sólo tocamos la realidad en la medida”. Ahora bien, una mayor precisión... ¿constituye un avance objetivo hacia la verdad? Pero esto supone la creencia en un sistema último de la naturaleza, como ideal inalcanzable, al cual nos iríamos aproximando de modo lento y más o menos seguro. A las pretensiones del realista, el instrumentalista podría decir que organizar nuestro conocimiento a partir de fórmulas y modelos más avanzados es una cuestión de eficiencia, sin que en ningún momento lleguemos a tocar nada de la “verdad”. El debate, aquí, termina en un punto muerto.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguinaga, R. (1990): *Mecánica*, Universidad Pontificia Comillas, Madrid.
- Alonso, M. & Finn, E. (1986): *Física*, vol. I. *Mecánica*, Addison-Wesley Iberoamericana, Wilmington, Delaware.
- Aristóteles (1982): *Metafísica*, Gredos, Madrid, ed. Trilingüe de V. García Yebra, 2ª ed. revisada.
- Aristóteles (1995): *Física*, Gredos, Madrid, traducción de G. Echandía.
- Armero, J., & Rada, E. (1989): *Filosofía de la Ciencia I*, UNED, 1989.
- Black, M. (1966): *Modelos y metáforas*, Tecnos, Madrid. Versión original, *Models and Metaphor*, Cornell University Press, New York, 1962.
- Boniolo, G. (2004): “Theories and Models: Really Old Hat?”, en *Yearbook of the Artificial*, vol. II. Peter Lang Academic Publishing Company, Bern, pp. 61-86.
- Boniolo, G., Petrovich, C. & Pisent, G. (2002): “Notes on the Philosophical Status of Nuclear Physics”, *Foundations of Science* 7: pp. 425-452.
- Bridgman, P.W. (1927): *The Logic of Modern Physics*, Macmillan, Nueva York.
- Burgos, J. de (1984): *Cálculo Infinitesimal*, Alhambra, Madrid.
- Calvo, D. (2004): “Los tres contextos de la investigación científica”, en Rivadulla, A. (ed.), *Hipótesis y verdad en ciencia, Ensayos sobre la filosofía de Karl R. Popper*, Facultad de Filosofía, Universidad Complutense de Madrid, pp. 179-191.
- Calvo, A. (1998): *Proyecto de infraestructura electrónica del sonar de fondos IA2*, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Pontificia Comillas.
- Campbell (1957): *Foundations of Science*, Dover Publications, Nueva York.
- Carnap, R. (1936): “Testability and Meaning”, *Philosophy of Science*, 3, pp. 420-468.
- Carnap, R. (1947): *Meaning and necessity*, University of Chicago Press, Chicago.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

- Carnap, R. (1966): *Philosophical Foundations of Physics*, Basic Books, New York.
- Cartwright, N. (1991): *How the Laws of Physics Lie*, Oxford University Press, Oxford. Sexta edición.
- Cartwright, N. (2001): *The Dappled World*, Cambridge University Press, Cambridge. Primera edición de 1999.
- Chapman, A. J. (1984): *Transmisión del calor*, Madrid, Bellisco. Versión española de O. Zabara y E. Muñoz, traducción de la 4ª edición en lengua inglesa publicada por McMillan Publishing Company.
- Chomsky, N. (1985): *Knowledge of Language: its Nature, Origins and Use*, Praeger Publishers, New York. Versión española de 1985, *El conocimiento del lenguaje. Su naturaleza, origen y uso*, Alianza Editorial, Madrid, traducción de E. Bustos.
- Combric, A. C. (1996): *Historia de la Ciencia: De San Agustín a Galileo, Tomo I, Siglos V-XIII*, Alianza, Madrid. Traducción de J. Bernia.
- Deligeorges, S. ed. (1990): *El mundo cuántico*, Alianza, Madrid. Versión española de Mª. C. Martín Sanz a partir de la edición francesa *Le monde quantique*, Editions du Seuil, 1985.
- Díez, J. A. & Moulines, U. (1997): *Fundamentos de Filosofía de la Ciencia*, Ariel, Barcelona.
- Duhem, P. (1985): *To Save the Phenomena* (ΣΩΖΕΙΝ ΤΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ), 1908, Midway reprint edition.
- Duhem, P. (1991): *The Aim and Structure of Physical Theories*, Princeton University Press.
- Echeverría, J. (1989): *Introducción a la Metodología de la Ciencia*, Barcanova, Barcelona.
- Einstein, A. (1994): *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, Alianza, Madrid.
- Einstein, A. et al. (1993): *La teoría de la relatividad: Sus orígenes e impacto sobre el pensamiento moderno*, Altaya, Barcelona, versión española de M. Paredes, a partir del original *Relativity Theory: Its Origins and Impact on Modern Thought*, John Wiley & Sons, Inc., 1968.
- Eisberg, R. & Resnik, R. (2000): *Física Cuántica. Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos y Partículas*, Limusa, México.

BIBLIOGRAFÍA

- Elena, A. (1985): *Las quimeras de los cielos. Aspectos epistemológicos de la revolución copernicana*, Siglo XXI, Madrid.
- Ferrater Mora, J. (1994): *Diccionario de Filosofía*, Ariel, Barcelona.
- Feyerabend, P. (1981): *Tratado contra el método*, Tecnos, Madrid. Traducción de D. Ribes.
- Garrido, M. (1995): *Lógica simbólica*, Tecnos, Madrid.
- Giere, R. (1988): *Explaining science. A cognitive approach*. University of Chicago Press, Chicago.
- Goodman, N. (1995): *Fact, Fiction and Forecast*, Harvard University Press, Cambridge, Mass.
- Hacking, I. (1996): Representar e intervenir, Paidós, México. Traducción de S. Martínez, a partir de *Representing and Intervening*, Cambridge University Press, 1983.
- Hall, R. (1985): *La Revolución científica 1500-1750*, Crítica, Barcelona. Traducción de J. Beltrán.
- Hanson, N. R. (1977): *Patrones de descubrimiento. Observación y explicación*, Alianza, Madrid. Traducción de E. García Camarero y A. Montesinos.
- Harman, P. M. (1990): *Energía, fuerza y materia. El desarrollo conceptual de la física del siglo XIX*, Alianza, Madrid.
- Harré, R. (1970): *The Principles of Scientific Thinking*, MacMillan, Londres.
- Hasenjaeger, G. (1962): *Conceptos y problemas de la lógica moderna*, Labor, Barcelona.
- Hempel, C. (1988): *Aspectos de la explicación científica*, Paidós, Buenos Aires.
- Hesse, M. (1966): *Models and Analogies in Science*, University of Notre Dame Press, Notre Dame.
- Hesse, M. (1993): "Models, Metaphors and Truth". En Ankersmit, F. R. y Mooij, J. J. A. (eds.): *Knowledge and Language*, vol. III. *Metaphor and Language*, Kluwer Academic Publ., Dordrecht.
- Howson, C. & Urbach, P. (1993): *Scientific Reasoning: The Bayesian Approach*, Open Court, Chicago and La Salle, Ill., 2ª edición.
- Hume, D. (1994): *Investigación sobre el conocimiento humano*, Altaya, Barcelona.
- Kant, I. (1997): *Crítica de la Razón Pura*, Alfaguara, Madrid, trad. de Pedro Ribas.
- Kline, M. (1992): *El pensamiento matemático de la Antigüedad a nuestros días*, Alianza, Madrid. Trad. de M. Martínez, J. Tarrés, A. Casal.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

- Kuhn T. S. (1975): *La estructura de las Revoluciones científicas*, FCE, México. Traducción de A. Contín.
- Kuhn, T. S. (1978): *La revolución copernicana*, Ariel, Barcelona.
- Kuhn, T. S. (1995): *¿Qué son las revoluciones científicas?*, Altaya, Barcelona.
- Lakatos, I. (1974): *Historia de la ciencia y sus reconstrucciones racionales*, Tecnos, Madrid. Traducción de D. Ribes.
- Lakatos, I. (1975): “La falsación y la metodología en los programas de investigación científica”, en Lakatos, I. & Musgrave, A. (eds.), *La crítica y el desarrollo del conocimiento*, Grijalbo, Barcelona. Traducción de F. Hernán.
- Lamb, W. (2001): “Super Classical Quantum Mechanics: A Better Interpretation of Non-Relativistic Quantum Mechanics”. En Gómez Pin, V. (ed.) (2001), 19-31.
- Landau, L. & Lifshitz, E. (1992): *Teoría clásica de los campos*, Reverté, Barcelona.
- Laudan, L. (1986): *El progreso y sus problemas. Hacia una teoría del crecimiento científico*. Ediciones Encuentro, Madrid.
- Lindberg, D. C. (1992): *The Beginnings of Western Science: The European Tradition in Philosophical, Religious, and Institutional Context, 600 B. C. to A. D. 1450*, University of Chicago Press, Chicago.
- Locke, J. (2000): *An Essay concerning Human Understanding*, J. M. Dent, Londres.
- Losee, J. (1997): *Introducción histórica a la filosofía de la ciencia*, Alianza, Madrid.
- Mach, E. (1960): *The Science of Mechanics*, Open Court Publ., Londres.
- Mach, E. (1993): “La ciencia de la mecánica”, en Einstein *et al.* (1993), pp. 25-33.
- Manson, S. (1996): *Historia de las ciencias. Tomo I. La ciencia antigua, la ciencia en Oriente y en la Europa Medieval*, Alianza, Madrid. Traducción de Carlos Solís.
- Marcellán, F., Casasús, L., & Zarzo, A. (1991): *Ecuaciones diferenciales. Problemas lineales y aplicaciones*, McGraw-Hill, Madrid.
- McKinsey, J. C., Sugar, J. C. C. & Suppes, P. C. (1953): “Axiomatic Foundations of Classical Particle Mechanics”, en *Journal of Rational Mechanics and Analysis*, II, pp. 253-272.
- Messiah, A. (1983): *Mecánica cuántica*, vol. I. Tecnos, Madrid.
- Moran, M. J. & Shapiro, H. N. (1994): *Fundamentos de Termodinámica Técnica*, Reverte, Barcelona.
- Morrison, M. (2001): *Unifying Scientific Theories*, Cambridge University Press, Cambridge.

BIBLIOGRAFÍA

- Mosterín, J. (1987): *Conceptos y teorías en la ciencia*, Alianza, Madrid.
- Moulines, U. C. (1982): *Exploraciones metacientíficas*, Alianza, Madrid.
- Munévar, G. (1998): *Evolution and the Naked Truth: A Darwinian Approach to Philosophy*, Ashgate Publishing Company, Aldershot.
- Munévar, G. (2002): “Critical Notice: Conquering Feyerabend’s ‘Conquest of Abundance’”, *Philosophy of Science*, 69, pp 519-535.
- Munévar, G. (2003): *Conocimiento radical: una investigación filosófica de la naturaleza y límites de la Ciencia*, Ediciones Uninorte, Barranquilla. Traducción de G. Guerrero Pino y G. Munévar.
- Nagel, E. (1961): *The Structure of Science*, Harcourt, New York.
- Peirce, C. S. (1931-1958): *Collected Papers*, 8 vols., C. Hartshorne, P. Weiss, y A. Burks, Harvard University Press, Cambridge.
- Pérez Sedeño, E. (1986): *El rumor de las estrellas*, Siglo XXI, Madrid.
- Pla, C. (1952): *Galileo Galilei*, Espasa-Calpe, Buenos Aires.
- Platón (1982): *Obras completas*, tomo VI. Traducción, prólogo, y notas de J. D. García Bacca, Facultad de Humanidades y Educación, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Platón (1992): *La república*, Alianza, Madrid. Traducción de J. M. Pabón y M. Fernández-Galiano.
- Poincaré, J. H. (1993): “Los principios de la física matemática”, en Einstein *et al.* (1993), pp. 51-60.
- Poincaré, J. H. (2002): *Ciencia e Hipótesis*, Espasa Calpe, Madrid. Traducción de A. Besio y J. Banfi.
- Popper, K. R. (1971): *La lógica de la investigación científica*, Tecnos, Madrid.
- Popper, K. R. (1983): *Realism and the Aim of Science*, Hutchinson, London. Versión española, *Realismo y el objetivo de la ciencia*, Tecnos, Madrid, 1985
- Popper, K. R. (1994): “Models, Instruments and Truth”, en *The Myth of the Framework. In defense of science and rationality*, Routledge, London. Versión española, *El mito del marco común*, Paidós, Barcelona, 1997.
- Ptolemy, C. (1984): *The Almagest*, Nueva York, Springer-Verlag, traducido por G. J. Toomer.
- Pulido, A. (1989): *Modelos econométricos*, Pirámide, Madrid.
- Putman, H. (1988): *Razón, verdad e historia*, Tecnos, Madrid.

MODELOS TEÓRICOS Y REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

- Quesada, D. (1985): *La Lógica y su filosofía*, Barcanova, Barcelona.
- Rioja, A. & Ordóñez, J. (2004): *Teorías del Universo, vol. I, De los pitagóricos a Galileo*, Síntesis, Madrid.
- Rivadulla, A. (1986): *Filosofía Actual de la Ciencia*, Tecnos, Madrid.
- Rivadulla, A. (1991): *Probabilidad e Inferencia Científica*, Anthropos, Barcelona.
- Rivadulla, A. (2002): "Representación por modelos y éxito empírico en ciencia". *Semana del Pensamiento Filosófico. Popper: Los grandes debates del siglo XX* (UIS, Bucaramanga, Colombia), 3/3 (octubre 2002), 105-117.
- Rivadulla, A. (2003): *Revoluciones en Física*, Trotta, Madrid.
- Rivadulla, A. (2003b): "Inconmensurabilidad y relatividad. Una revisión de la tesis de Thomas Kuhn": *Revista de Filosofía*, 28/2, 237-259.
- Rivadulla, A. (2004): *Éxito, razón y cambio en física*, Trotta, Madrid.
- Rose, S. et al. (1983): *Historia y relaciones sociales de la Genética*, Fontalba, Barcelona. Traducción de M. Hernández y L. Vilageliu.
- Russell, J. B., & Larena, A. (1988), *Química*, McGraw-Hill, México.
- Sedra, A. & Smith, K. C. (1989): *Dispositivos electrónicos y amplificación de señales*, Mc Graw-Hill, México.
- Sneed, J. (1971): *The Logical Structure of Mathematical Physics*, D. Reidel, Dordrecht.
- Stegmüller, W. (1974): "Dinámica de teorías y comprensión lógica", en *Teorema*, 4, pp. 513-553, traducción de D. Quesada.
- Stegmüller, W. (1981): *La concepción estructuralista de las teorías*, Alianza, Madrid. Traducción de J. L. Zofío.
- Suárez, M. (2003): "Scientific Representation: Against Similarity and Isomorphism", *International Studies in the Philosophy of Science*, 17, 3, octubre 2003, pp. 225-244.
- Suppe, F. (1990): *La Estructura de las Teorías Científicas*, UNED, Madrid. Traducción de E. Rada y P. Castrillo.
- Suppes, P. (1967): "What Is a Scientific Theory?", en Morgenbesser (ed.), *Philosophy of Science Today*, Basic Books, New York, pp. 55-67.
- Tarski, A. (1956): *Logic, semantics, metamathematics*, Papers from 1923 to 1938, Clarendon Press, Oxford.
- Taylor, E. F. & Wheeler, J. A. (1992): *Spacetime Physics. Introduction to Special Relativity*, W. H. Freeman and Company, New York, 1992, 2ª ed.; 4ª reimpr., 1997.

BIBLIOGRAFÍA

- Thomson, S. W. (1884): *Notes of Lectures on Molecular Dynamics and the Wave Theory of Light*, The Johns Hopkins University, Baltimore.
- Toulmin, S. (1961): *Foresight and Understanding*, Hutchinson, Londres.
- van Fraassen, B. (1996): *La imagen científica*, Paidós, México. Traducción de S. Martínez, a partir de *The Scientific Image*, Clarendon Press, Oxford, 1980.
- van Fraassen, B. (1990): *Laws and Symmetry*, Clarendon Press, Oxford.
- Vega, L. (1987): *El análisis lógico: nociones y problemas, vol. I, Una introducción a la filosofía de la lógica*, UNED, Madrid.
- Weyl, H. (1965): *Filosofía de las matemáticas y de la ciencia natural*, Centro de Estudios Filosóficos, UNAM, México.
- Wigner, E. (1967): "Symmetry and Conservation Laws", en *Symmetries and Reflections*, Indiana University Press, Bloomington, Ind., 1967, 14-27. Reimpreso en Wigner, E. P., *Philosophical Reflections and Syntheses*, Springer, Berlin, 1995, 297-310.
- Wittgenstein, L. (1922): *Tractatus Logico-Philosophicus*, Routledge and Degan Paul, Londres.