



ABRIR TOMO I



**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE FILOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE FILOLOGÍA INGLESA**

***LA COHESIÓN DEL TEXTO CIENTÍFICO-TÉCNICO.
UN ESTUDIO CONTRASTIVO INGLÉS-ESPAÑOL***

ANEXOS

Directora:
Dra. Ángela Downing Rothwell
Catedrática de Universidad

Tesis doctoral presentada por:
Inmaculada Álvarez de Mon y Rego

1999

ANEXOS

NOTA PRELIMINAR

Se presenta ahora, en los anexos del 1 al 12, la muestra de textos analizada. Los textos se han separado por oraciones ortográficas que, en este tipo de texto, coinciden en casi todos los casos con la cláusula simple o compleja.

En cada oración se han señalado las expresiones que establecen la cohesión con la oración anterior. En algunos casos, las oraciones mantienen más de un punto de unión. Estos puntos de unión se han señalado en mayúsculas cuando se trata de cohesión en el plano del contenido y mediante entidad coincidente o relacionada. También se han señalado en mayúsculas los casos de encapsulamiento en el plano interactivo. Mediante subrayado se señalan los anuncios. Cuando aparecen mayúsculas y subrayado, se trata de anuncios con encapsulamiento implícito.

Por último, el anexo 13 recoge la clasificación de las oraciones del texto en cuanto al mecanismo de cohesión presente en cada una.

ANEXO 1

THE QUANTUM-EFFECT DEVICE: TOMORROW'S TRANSISTOR?

0.1 THE COMPONENTS OF ORDINARY INTEGRATED CIRCUITS can be made only so small before disruptive effects impair their function.

0.2 BEYOND THAT SIZE LIMIT a new species of semiconductor device could take over.

PÁRRAFO 1

1. THE ELECTRONICS INDUSTRY AND INTEGRATED CIRCUITS share an inverse destiny.
2. THE INDUSTRY grows as CIRCUITS shrink, and growth will continue as long as more and more circuits can be crammed on a single chip.
3. BUT common sense and careful analyses indicate that perhaps within a decade DOWNSCALING will run up against the limits of circuit technology.
4. Even if PRACTICAL LIMITS are overcome, the physical laws that govern the behavior of circuit components set fundamental limits on the size of the components' features.
5. In order to keep expanding, THE ELECTRONICS INDUSTRY needs another technological revolution.

PÁRRAFO 2

7. As a physicist with Texas Instruments, Incorporated, I have for many years been aware of the urgency of developing a new frontier for SEMICONDUCTOR DEVICES.
8. In 1982 my colleague Pallab K. Chatterjee published a study that heightened MY CONCERN by stressing how close the downscaling endpoint was.
9. There is still some disagreement over THAT FIGURE, with estimates of minimum feature sizes ranging between 100 and 500 billionths of a meter.
10. While disputing THE PROBLEM, many of us arrived at the same solution:
11. that some of the very phenomena that impose SIZE LIMITS ON ORDINARY CIRCUITS could be exploited in a new generation of vastly more efficient devices.
12. The functional bases for THESE DEVICES are quantum-mechanical effects that carry semiconductor technology into a realm of physics where subatomic particles behave like waves and pass through formerly impenetrable barriers.
13. WITH THE SO-CALLED QUANTUM SEMICONDUCTOR DEVICE, I believe it will be possible to put the circuitry of a supercomputer on a single chip.

PÁRRAFO 3

14. The structures for QUANTUM DEVICES have already been made using the same materials as today's chips: doped silicon, doped and undoped gallium arsenide, and aluminum gallium arsenide.

15. Because THEY can be about 100 times smaller than the devices in present-day integrated circuits, HOWEVER, designing and fabricating a viable device presents a formidable challenge.
16. MANUFACTURING PROCESSES will have to become considerably more sophisticated, and new strategies for interconnection and architecture will have to be devised to cope with the especial problems of size reduction.

PÁRRAFO 4

17. As daunting as they are, THESE ADJUSTMENTS are worth making in order to realize the ten-thousandfold reduction in cost per function that quantum devices could bring about.
18. THEY are ALSO minor compared with the difficulty of introducing new materials for which no relevant process technology exists.
19. AND THE PROGRESS that has been made at Texas Instruments as well as at other laboratories around the world suggests that quantum devices just might embody the revolution the electronics industry awaits.

PÁRRAFO 5

20. The motive for SHRINKING THE COMPONENTS OF INTEGRATED CIRCUITS is minimizing the cost and time needed to perform each circuit function.
21. MOST FUNCTIONS are carried out by transistors, which act essentially as switches.

22. IN A TRANSISTOR the speed and precision with which SWITCHING can be controlled, as well as the power needed to produce the switching, has everything to do with the time and cost per function attained by the device.
23. Because of its size, A TRANSISTOR SWITCH that operates on the principles of quantum mechanics would be faster and would consume less power than a conventional transistor;
24. because of effects peculiar to QUANTUM PHENOMENA, IT could also afford a greater degree of control.

PÁRRAFO 6

25. THESE ATTRIBUTES can best be appreciated in comparison with the performance of conventional transistors.
26. THE MOST COMMONLY USED TRANSISTORS TODAY are field-effect transistors, or FET's.
27. THEY are made from semiconducting materials doped with elements that provide carriers for electric charge.
28. THE CHARGE CARRIERS can be either electrons, which bear a negative charge, or positive «holes»;
29. a semiconductor that has electrons as CHARGE CARRIERS is said to be negatively doped (n-doped) and a semiconductor that conveys charge by the movement of holes is said to be positively doped (p-doped).

30. SILICON has been the traditional stuff of integrated circuits, but GALLIUM ARSENIDE (GAAS) TRANSISTORS have been constructed that are faster.

PÁRRAFO 7

31. THE TWO TYPES OF TRANSISTOR have slightly different configurations.

32. IN A TYPICAL SILICON FET a region of n-doped silicon called the source is separated from another n-doped region, the drain, by a p-doped channel.

33. ON TOP OF THE CHANNEL there is a metal electrode called the gate, which is kept from coming in direct contact with the p-doped silicon by a layer of insulating silicon oxide.

34. (THIS METAL-OXIDE-SEMICONDUCTOR ARRANGEMENT is the derivation for the common acronyms n-MOS, p-MOS and MOSFET).

35. A positive voltage is applied to THE DRAIN;

36. when A WEAKER POSITIVE POTENTIAL is ALSO applied to THE GATE, electrons cluster in the silicon channel under the gate and create a bridge of negative charge carriers between the two n-doped regions.

37. THIS BRIDGE, called the inversion layer, enables electrons in the source to flow toward the positive voltage on the drain.

38. THE CURRENT FLOW can be interrupted by removing the potential on the gate, thereby dispersing the electrons in the inversion layer.

PÁRRAFO 8

39. A GALLIUM ARSENIDE TRANSISTOR also has a gate electrode and terminals that serve as source and drain, but the n-doped part of the substrate is not localized
40. [see »GALLIUM ARSENIDE TRANSISTORS,» by William R. Frensley; SCIENTIFIC AMERICA, August, 1987].
41. When a positive potential is applied to THE GATE AND THE DRAIN, current flows freely from the source;
42. if THE GATE is given a negative voltage, IT repels electrons from the area under it, blocking the path of conduction.

PÁRRAFO 9

43. BOTH TRANSISTORS are three-terminal devices, and in both of them adjusting the voltage on the gate is the most sensitive means of switching the device.
44. HENCE THE TRANSISTORS can be switched «on» and «off» by changing the voltage on the gate.
45. THESE DEVICES work well at present scales, but with downscaling the distinction between switching states becomes blurred.
46. AT SMALLER SCALES current leakage prevents a transistor from being truly «off»;
47. IT ALSO causes unnecessary consumption of power.

48. Impurities or defects in THE SEMICONDUCTOR CRYSTAL can scatter electrons, slowing both conduction and switching.
49. For all its usefulness, THE MODERN FET has a problem:
50. the smaller IT gets, the worse IT switches.

PÁRRAFO 10

51. Because the way in which QUANTUM SEMICONDUCTOR DEVICES would function is qualitatively different, quantum devices promise more precise and efficient control of switching in a size regime ORDINARY TRANSISTORS could never approach.
52. THIS DIFFERENCE is manifested in THE CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS.
53. IN PARTICULAR, some quantum semiconductor devices exhibit NEGATIVE DIFFERENTIAL RESISTANCE:
54. THAT IS, there is A VOLTAGE RANGE IN WHICH THE CURRENT DECREASES AS THE APPLIED VOLTAGE IS INCREASED.
55. On a graph of current versus voltage, THIS PROPERTY translates into a current peak and a current valley.
56. THE PRESENCE OF NEGATIVE DIFFERENTIAL RESISTANCE is often the only indication a physicist has that quantum effects are operative in an experimental device.

PÁRRAFO 11

57. The elusive phenomenon at the heart of QUANTUM EFFECTS is the wave nature of electrons.
58. QUANTUM THEORY predicts that AN ELECTRON will exhibit wavelike behavior whenever the region within which it is confined, or the barriers erected to contain it, has dimensions approaching the electron's wavelength.
59. HENCE at least one dimension of the features in a quantum device is comparable to THE WAVELENGTH OF AN ELECTRON.
60. In gallium arsenide at room temperature THAT WAVELENGTH measures just 200 angstrom units (20 billionths of a meter).

PÁRRAFO 12

61. The barriers that can contain ELECTRONS are barriers of energy rather than physical barriers.
62. ALL ELECTRONS possess a finite amount of energy and are said to occupy energy levels;
63. THE LEVELS AVAILABLE are characteristic of a given material.
64. A GROUP OF CLOSELY SPACED LEVELS is called a band.
65. In most solids THE ENERGY LEVELS IN EACH BAND are SO CLOSELY SPACED that they are essentially continuous, and so an electron can change levels with only an infinitesimal boost of energy.

PÁRRAFO 13

66. The relative positions of ENERGY BANDS determine whether electricity can be conducted across two different materials.
67. For an electron to pass from ONE MATERIAL TO ANOTHER with no change of energy, THE BANDS OF THE TWO MATERIALS must overlap.
68. SPECIFICALLY, IN THE FIRST MATERIAL the average level occupied by electrons -called the Fermi level- must coincide with an energy band of THE SECOND MATERIAL.
69. If THE ENERGY BAND OF THE SECOND MATERIAL occurs at a much higher energy level than the Fermi level of the first, THE SECOND MATERIAL acts as a barrier to electron movement.

PÁRRAFO 14

70. FOR EXAMPLE, under ordinary circumstances ALUMINUM GALLIUM ARSENIDE (ALGAAS) presents a barrier to the electrons IN N-DOPED GALLIUM ARSENIDE.
71. An electron cannot pass from THE DOPED GAAS TO ALGAAS because the conduction band of ALGAAS is at a much higher energy level than the Fermi level of THE GAAS.
72. YET if the physical dimensions of THE BARRIER are altered in such a way that the wave nature of electrons comes into play, an electron will «tunnel» through the ALGAAS that was once an obstacle.
73. HENCE when A LAYER OF ALGAAS THINNER THAN 200 ANGSTROMS is

sandwiched between two pieces of doped GaAs, the electrons tunnel through it to the GaAs on the other side.

74. THIS TUNNELING is one kind of quantum effect.

PÁRRAFO 15

75. When barriers confine electrons within a space comparable to an electron wavelength, the electrons are subject to TWO OTHER, INTERRELATED QUANTUM EFFECTS: size quantization and resonance.

76. SIZE QUANTIZATION causes the continuum of energy levels that usually exists in the conduction band of a solid to become articulated into discrete energy quanta, or states.

77. IT is most aptly described by a density-of-states graph, which shows the number of allowed discrete states of an electron within a fixed energy range.

PÁRRAFO 16

78. When, FOR EXAMPLE, a slice of undoped gallium arsenide is enclosed within AlGaAs barriers, THE DENSITY-OF-STATES GRAPH for the GaAs looks more like a ladder than a hill.

79. THE DEGREE OF QUANTIZATION depends on the degree of confinement.

80. When the electrons in GaAs ARE RESTRICTED in all three dimensions (a «quantum dot»), their energy levels are completely discontinuous;

81. IN ONE-DIMENSIONAL RESTRICTION (a «quantum well») AND TWO-DIMENSIONAL RESTRICTION (a «quantum wire») THE LEVELS are still somewhat continuous.

PÁRRAFO 17

82. Resonance, the other consequence of QUANTUM CONFINEMENT, occurs only when some degree of size quantization has been achieved.

83. Electron waves that enter, say, A QUANTUM WELL are reflected off the far wall of the well;

84. THE WAVES essentially bounce back and forth within the quantum chamber.

85. In doing SO THEY increase the tunneling current substantially - THEY resonate.

86. Both size quantization and resonance result from the constructive interference of THE FORWARD AND BACKWARD WAVES.

87. It is difficult to separate the current enhancement that can be attributed to RESONANCE from the enhancement that results from THE INCREASED DENSITY OF STATES AT A GIVEN ENERGY LEVEL.

PÁRRAFO 18

88. As it happens, THAT DISTINCTION is not crucial for transistor operation.

89. WHAT DOES MATTER is that IN A QUANTUM-EFFECT DEVICE two slightly different voltages can evoke profoundly different responses.

90. THE DIFFERENCES should be most pronounced in the most confined structure, the quantum dot, because IT exhibits the highest degree of quantization.
91. At voltages where TUNNELING occurs, current is enhanced by the high density of states and by resonance effects to create a peak;
92. AT OTHER VOLTAGES, the total absence of states at energies intermediate between quantum levels ensures that very little tunneling occurs, and a valley in the current is thus created.

PÁRRAFO 19

93. To visualize how THESE QUANTUM EFFECTS could come in handy in a transistor, imagine two slabs of n-doped GaAs separated by an AlGaAs-GaAs quantum dot.
94. Electrons trying to pass from ONE SLAB OF DOPED GAAS TO THE OTHER must tunnel through a layer of AlGaAs into THE QUANTUM DOT and then through another stretch of AlGaAs.
95. THEY cannot enter the quantum dot, HOWEVER, unless one of the energy levels IN THE DOT is on a par with the Fermi level of the doped gallium arsenide from which the electrons are emitted.

PÁRRAFO 20

96. THE FERMI LEVEL OF THE GAAS «EMITTER» can be raised with respect to the rest of the structure by applying a positive voltage to the doped GaAs on the opposite side of the dot -the «collector.»

97. At some voltage THE FERMI LEVEL OF THE EMITTER will attain the same energy as one of the energy levels in the dot, and electrons will move into and resonate within the dot.
98. There is a single voltage at which THIS occurs;
99. The conduction that takes place AT OTHER VOLTAGES owing to thermal excitation and to leakage and scattering is negligible.
100. HERE, THEN, is a way to control precisely the switching of a semiconductor device.

PÁRRAFO 21

101. Although from THIS DESCRIPTION the incorporation of a quantum-dot structure in A SO-CALLED QUANTUM COUPLED DEVICE may seem like a remote possibility, actually the realization of such a device may not be too many years away.
102. INDEED, the exploitation of QUANTUM EFFECTS IN SEMICONDUCTOR DEVICES dates from the 1950's.
103. The Esaki tunnel diode, named for its inventor, Leo Esaki, now at the IBM Corporation's Thomas J. Watson Research Center in Torktown Heights, N.Y., was THE FIRST QUANTUM SEMICONDUCTOR DEVICE.
104. IN THIS DIODE n- and p-doped semiconductors were juxtaposed to create a layer having no charge carriers at all.
105. When THE DOPING was extremely high, THE SO-CALLED DEPLETION LAYER became thin enough for electrons to tunnel through.

106. THE DIODE never had widespread appeal, HOWEVER, because the three-terminal devices that were coming of age at the time proved to be MORE EFFICIENT AND CONVENIENT.

PÁRRAFO 22

107. In the 1960's workers at the Watson Research Center verified that QUANTUM CONFINEMENT in one dimension takes place in the inversion layer of silicon MOSFET's.

108. Because the influence of QUANTUM EFFECTS on device characteristics was so small, THAT DISCOVERY had little impact on transistor development.

109. SUBSEQUENT WORK by Nick Holonyak, Jr., of the University of Illinois at Urbana-Champaign made quantum wells standard ingredients in lasers.

110. In the 1970's Esaki, along with Leroy L. Chang of the Watson Research Center and Raphael Tsu, now at North Carolina Agricultural and Technical State University, carried out THE EARLIEST EXPERIMENTS ON RESONANT TUNNELING THROUGH WELLS.

111. QUANTUM EFFECTS were not deliberately induced in transistors until recently, in the so-called modulation-doped FET's.

112. THE QUANTUM WELLS IN THESE DEVICES, HOWEVER, serve only to improve the mobility of electrons that otherwise act as they do in conventional transistors.

PÁRRAFO 23

113. While seemingly tangential, THESE DEVELOPMENTS helped to advance the techniques required to make quantum semiconductor devices, so that the technology for constructing experimental structures was at hand when interest in the field finally blossomed.
114. For the past four years THE REALIZATION OF ZERO-DIMENSIONAL QUANTUM STRUCTURES has been the focus of attention for workers around the world.
115. At the AT&T Bell Laboratories, IBM, the Massachusetts Institute of Technology, the University of Cambridge and the Philips Research Laboratories, SIZE QUANTIZATION IN QUANTUM WIRES has been demonstrated in silicon and gallium arsenide devices alike;
116. QUANTUM DOTS have been fabricated at AT&T, Bell Communications Research, the Hughes Research Laboratories and the University of Glasgow as well as at Texas Instruments, where the clearest indication of size quantization in dots has been found.

PÁRRAFO 24

117. An operational semiconductor device has yet to be constructed from A QUANTUM-DOT STRUCTURE, but a prototype should be available within one or two years.
118. One of the objectives of current research is the conversion of QUANTUM DEVICES, which are most readily constructed as diodes, to three-terminal devices with a third contact directly modulating the potential of the quantum structure.

119. SUCH A CONNECTION would yield the most compact device, and one that would most closely approach the maximum switching speed afforded by tunneling.
120. Devising a technology to manufacture reliable and nondestructive CONTACTS FOR SUCH THIN LAYERS, HOWEVER, will require a great deal of ingenuity.

PÁRRAFO 25

121. By placing QUANTUM DOTS in close proximity, ELECTRONS might ALSO be enabled to tunnel from one dot to another - from one quantized state to another.
122. THIS ARRANGEMENT would provide the ultimate in circuit control because the energy states the electrons could assume at both the point of departure and the point of arrival would be strictly dictated.
123. AGAIN, THE CHALLENGE lies in the formidable task of fabricating structures hundreds of times smaller than any of the features in current semiconductor products.
124. AND THAT DEGREE OF DOWNSCALING will IN TURN bring about problems with interconnections and architecture that industry will have to solve before quantum semiconductor devices can be regarded as marketable entities.

PÁRRAFO 26

125. The commitment of so many research teams to a problematic technology attests to the tremendous potential of THESE DEVICES and to the faith that THEY will take the lead in the next semiconductor revolution.

126. THE COSTS AND RISKS INVOLVED must be borne in order to revitalize a rapidly maturing electronics industry;
127. THE RESULTS can only benefit a society that has learned to depend on integrated circuits in many ways.

ANEXO 2 MICROCLUSTERS

- 0.1. SMALL AGGREGATES OF ATOMS constitute a distinct phase of matter.
- 0.2. THEIR chemistry, at once highly reactive and selective, has possible applications in catalysis, optics and electronics.

PÁRRAFO 1

1. DIVIDE AND SUBDIVIDE A SOLID and the traits of its solidity fade away one by one, like the features of the Cheshire cat, to be replaced by characteristics that are not those of liquids or gases.
2. THEY belong INSTEAD to a new phase of matter, the microcluster.

PÁRRAFO 2

3. MICROCLUSTERS consist of tiny aggregates comprising from two to several hundred atoms.
4. THEY pose questions that lie at the heart of solid-state physics and chemistry and the related field of materials science:
5. How small must AN AGGREGATE OF PARTICLES become before the character of the substance they once formed is lost?

6. How might THE ATOMS reconfigure themselves if freed from the influence of the matter that surrounds them?
7. If the substance is a metal, how small must ITS CLUSTER OF ATOMS be to avoid that characteristic sharing of free electrons that underlies conductivity?
8. Do GROWING CLUSTERS proceed gradually from one stable structure to another, largely through the simple addition of atoms, or do they undergo radical transformations as they grow?

PÁRRAFO 3

9. Many CLUSTER properties are determined by the fact that a cluster is mostly surface.
10. A CLOSELY PACKED CLUSTER OF 20 ATOMS has only one atom in its interior;
11. A CLUSTER MADE UP OF 100 ATOMS may have only 20.
12. OTHER PROPERTIES stem from clusters' unfilled electronic bonding capability, which leaves them «naked» and hence extremely reactive.
13. THIS REACTIVITY makes them effective tools for the study of the solid state and, potentially, for such industrial processes as the growing of crystals, selective chemical catalysis and the creation of entirely new materials with made-to-order electronic, magnetic and optical properties.
14. SUCH MATERIALS, IN TURN, could enhance the performance of products as diverse as lasers, photographic films, electrosensitive phosphors, magnetic disks and supercomputers.

PÁRRAFO 4

15. The potential importance of CLUSTERS was recognized long before they could be prepared in the laboratory.
16. Perhaps the earliest reference to CLUSTERS was made in 1661 by the English chemist Roberto Boyle, in his *Sceptical Chymist*, which speaks of «minute masses or clusters [that] were not easily dissipable into such particles as composed them.»
17. Because of their microscopic size and extreme chemical reactivity, CLUSTERS could not be investigated with the techniques of traditional surface chemistry or even synthesized in the laboratory, until the 1950's.
18. IN THESE EARLY EFFORTS, an oven was used to vaporize a metal, which was then precipitated as clusters on a substrate.
19. ALKALI METALS SUCH AS SODIUM AND POTASSIUM were tried first, at about 1,000 degrees Celsius;
20. METALS WITH HIGHER MELTING AND VAPORIZING POINTS were studied LATER.
21. BUT THE METALS WITH THE HIGHER TRANSITION TEMPERATURES could usually be made in clusters of only three to five atoms.
22. THIS made it impossible to determine how many atoms were required for the emergence of properties more like a solid and less like a cluster.

PÁRRAFO 5

23. A MORE GENERALLY EFFECTIVE PROCEDURE, in which a solid metal is vaporized with a laser, was devised in 1981 by two groups, one led by Richard E. Smalley of Rice University, the other by Vladimir E. Bondybey of AT&T Bell Laboratories.
24. One of us (Duncan) was a doctoral student under SMALLEY at the time and was therefore one of the first to observe LASER-GENERATED CLUSTERS.
25. THE TECHNIQUE has been refined considerably and can now produce clusters of up to 100 or more atoms composed of virtually any substance that can exist as a solid.
26. CLUSTERS have ALSO been made of mixed materials.

PÁRRAFO 6

27. THE PROCESS begins when pulsed laser light is tightly focused on a metal bar or disk that sits in a channel, evaporating its atoms into an extremely hot plasma.
28. A gust of helium, released previously into THE CHANNEL, cools THE VAPOR so that it condenses and forms clusters of varying sizes.
29. IT sweeps the clusters along into an evacuated chamber, where the pressure differential causes the spray to expand supersonically.
30. Collisions that take place during THE EXPANSION cool the clusters to a temperature near absolute zero, stabilizing them for further study.

PÁRRAFO 7

31. The center of THE SPRAY passes through an aperture on the opposite side of the chamber.
32. THE RESULTING BEAM is THEN irradiated by an ultraviolet laser energetic enough to strip electrons from the clusters.
33. REMOVAL OF THE ELECTRONS imparts a positive charge to the clusters, so that they can be accelerated in an electric field of given strength over a path of known length.
34. This instrument, a time-of-flight mass spectrometer, sorts THE CLUSTERS into different packets, with the heaviest species (those with the most atoms) at one extreme and the lightest ones at the other.

PÁRRAFO 8

35. Subtle clues to CLUSTER geometry can be gleaned from the distribution of cluster sizes.
36. THE SIZES that appear particularly often are thought to be associated with particularly stable configurations.
37. SUCH CLUSTER SPECIES, which appear as spikes when the number of atoms is graphed, are called magic numbers (by analogy with the quantum model of atomic nuclei, in which certain combinations of protons and neutrons are allowed and others are not).

PÁRRAFO 9

38. MAGIC NUMBERS may sometimes be useful predictors of geometry.
39. Consider, for a moment, the mass spectrum of lead, in which SEVEN- AND 10-ATOM CLUSTERS are found at twice the frequency of neighboring species, or cluster sizes.
40. EACH OF THESE TWO FORMS is believed to have a structure that is a precursor to packing patterns seen in solid lead.
41. THE 10-ATOM FORMATION is a key element in the diamond lattice structure, in which chemical bonds act in fourfold symmetry to keep atoms fixed in relatively open networks.

PÁRRAFO 10

42. SEVEN-ATOM CLUSTERS may form pentagonal bipyramids, with five atoms in a plane and the sixth and seventh above and below it, respectively.
43. THESE CONFIGURATIONS are the first building blocks of cubic close-packing, a familiar pattern that is seen in solid lead.

PÁRRAFO 11

44. PENTAGONAL BIPYRAMIDS can easily accept six more atoms to form icosahedrons - nearly spherical figures that are the most stable way to close-pack a cluster.
45. THEIR pattern differs only slightly from that found in a close-packed solid.

PÁRRAFO 12

46. ANOTHER EXAMPLE OF HOW STRUCTURES ARE INFERRED FROM MASS SPECTRAL DATA is seen in the case of 14-atom lead clusters, which occur at only one third the frequency of cluster sizes.
47. THAT PHENOMENON can be explained by the relative stability ascribed by theory to the 13-atom icosahedral cluster, a stability that makes it difficult for 14 atoms to cohere.
48. THEY tend, INSTEAD, to form a 13-atom cluster, leaving one atom free.

PÁRRAFO 13

49. We became interested in applying MAGIC NUMBERS to the study of CLUSTERS made of mixed metals that form alloys in the solid state.
50. In OUR research at the university of Georgia WE discovered that CLUSTERS OF LEAD MIXED WITH ANTIMONY - both members of the main-group metals- had elemental ratios that diverged unexpectedly from those found in the alloy.
51. Two mass peaks indicated the disproportionate presence of one ion with TWO LEAD AND THREE ANTIMONY ATOMS and another ion with FOUR ATOMS OF LEAD AND FIVE OF ANTIMONY.
52. It struck US that SUCH BONDING PATTERNS had been observed in a class of stable molecules known to inorganic chemists as Zintl ions, whose structure was known from X-ray crystallography.

53. OUR MICROCLUSTERS (and a related family of gas-phase alloy clusters, in which the constituent particles are themselves mixed molecules of different metals) seemed to have stability patterns like those of ZINTL IONS, which suggests that their structures are the same: five atoms in a trigonal bipyramid (with six triangular faces) or nine atoms in a capped, square antiprism (with 12 triangular faces and one square face).

PÁRRAFO 14

54. Perhaps MOST APPEALING OF ALL for their mathematical beauty are THE TWO STRUCTURES that have been proposed for cluster species of carbon and silicon, respectively.

55. Although THE PUTATIVE STRUCTURES have the great theoretical stability that would be expected for the species, which are remarkably inert, no conclusive evidence for their existence has yet been adduced.

56. THE CARBON STRUCTURE holds 60 atoms in an open cage of hexagons and pentagons resembling a soccer ball.

57. Smalley calls IT «buckminsterfullerene», in honor of the inventor of the geodesic dome, and suggests that it may be the interstellar dust whose absorption of radiation is thought to account for the observed gap in the ultraviolet spectrum.

58. Recently SMALLEY has proposed A STILL MORE COMPLEX SHAPE, also faced in hexagonal and pentagonal rings, for the cluster of 45 silicon atoms.

PÁRRAFO 15

59. It may seem natural to impute a kind of protosolidity to TINY CLUSTERS OF A MATERIAL that would be a solid if only there were enough of it.
60. INDEED, THIS IMPUTATION appears to be valid for those metals whose cluster-packing structure closely resembles that found in bulk.
61. BUT IN OTHER CASES SUCH AN APPROACH presumes more than the evidence will bear.

PÁRRAFO 16

62. A COUNTEREXAMPLE is seen in the case of clusters that form isomers, different molecular configurations that may be assumed by a given chemical compound.
63. EACH ISOMER is locally stable because it economizes on energy, but it may shift to a different isomeric form if enough energy is introduced through heating.
64. One example of SUCH «FLUXIONAL» CLUSTERS is the sodium trimer:
65. THE THREE ATOMS form an isosceles triangle whose unique angle continually bounces from one vertex to the other even at temperatures just above absolute zero.
66. Because THEIR SHAPE is not fixed on a microscopic level, fluxional clusters should perhaps be regarded more as liquid droplets than as solid particles, to the extent that such words have meaning on this level.

PÁRRAFO 17

67. One can learn about CLUSTER geometry from other kinds of data.
68. Electronic configurations, FOR EXAMPLE, have a direct bearing on the frequency of VARIOUS CLUSTER SIZES because specific electronic bonding patterns make certain clusters particularly stable.
69. THESE PATTERNS depend on the orbitals from which the electrons originate and on the degree of freedom enjoyed by the electrons.
70. When ELECTRONS are shared by the whole cluster in a delocalized pattern, so that negative charge is no greater at one point than another, the cluster may take on certain aspects of solid metal, such as conductivity.
71. When THE ELECTRONS are all tightly bound to atoms, THE CLUSTERS resemble discrete molecules.

PÁRRAFO 18

72. DELOCALIZED ELECTRONS are found in CLUSTERS of such alkaline metals as sodium and potassium and in such coinage metals as copper and silver.
73. BOTH CLASSES OF METAL ATOMS have a single electron in the s orbital that is then dispersed, or shared, among all the atoms in a given cluster.
74. As THE NUMBER OF ATOMS IN THE CLUSTER rises, the atomic orbitals combine to form molecular orbitals containing all the cluster's electrons;

75. MOLECULAR ORBITALS THEN give way gradually to «bands», or energy states, akin to those of a solid.
76. THESE METALS show cluster frequency peaks at the sizes that are predicted by a quantum model for a spherically symmetrical body with shared electrons.
77. THE PREDICTIONS closely resemble magic numbers derived from the quantum model of atomic nuclei and are similar in some respects to the electron shells calculated for the hydrogen atom.

PÁRRAFO 19

78. As Walter D. Knight, Marvin L. Cohen and their co-workers at the University of California at Berkeley have discovered, abundance peaks coincide with SODIUM CLUSTERS of 8, 20, 40, 58 and 92 atoms.
79. The pattern constitutes compelling evidence that the electrons IN THESE PARTICULAR CLUSTER SYSTEMS are delocalized in the same general way as electrons in the corresponding solids.
80. It should be noted, HOWEVER, that the quantum model that predicts THESE ABUNDANCE PEAKS cannot be translated to the solid state, which, unlike the cluster, is not a spherically symmetrical system.

PÁRRAFO 20

81. Bonds seem to be more localized in CLUSTERS OF MAIN-GROUP METALS such as lead and antimony.

82. HERE the outermost electrons occupy the p orbitals, which are spatially more constricted.
83. Only P ELECTRONS participate in bonding, which gives the bonds more of a local character than is the case for the alkali and coinage metals.
84. THESE MAIN-GROUP METALS tend to be less reactive, which explains why they sometimes form naked clusters when dissolved in liquids, as exemplified by Zintl ions.
85. ZINTL IONS are particularly stable because their electron shells are closed;
86. THUS, it is shown that p bonding dominates THESE ELECTRONIC SYSTEMS both in the gas phase and in the condensed phase.
87. It is ALSO believed that D BONDING is involved in transition metals such as iron, chromium and nickel, but these metals are harder to model.

PÁRRAFO 21

88. FURTHER INFORMATION ABOUT THE ELECTRONIC CONFIGURATION OF CLUSTERS can be gleaned from the amount of energy it takes to eject an electron from one of them.
89. In the case of molecules, THIS ENERGY REQUIREMENT is called the ionization potential;
90. for solids IT is known as the work function.

91. Lone atoms grip their electrons more tightly than clusters of atoms grip shared electrons, which is why most metals have ionization potentials about twice as high as THEIR WORK FUNCTIONS.
92. If CLUSTERS behave like bits of a solid, theory would predict a smooth, inverse relation between cluster size and electron-binding energy that would converge, at the limit, with the work function.

PÁRRAFO 22

93. Andrew Kaldor and his colleagues at the Exxon Research and Engineering Company were among the first to determine the ionization potentials of iron and niobium CLUSTERS.
94. THEY irradiated CLUSTERS with a tunable ultraviolet laser, beginning with a low-energy frequency and slowly increasing the frequency until they detected the first charged clusters in their spectrometer.
95. THEY continued to increase THE LASER'S FREQUENCY while plotting the distribution of cluster mass, and indeed, they found that as cluster size increased, ionization potential decreased.
96. BUT THE CURVE was not smooth;
97. CERTAIN CLUSTERS behaved more like molecules than like bits of a solid.
98. THESE RESULTS, as well as those of other researchers working with different metals, show that in clusters of up to 100 atoms the ionization potential does not converge to the work function.

99. The transition from THE CLUSTER PHASE to the solid phase clearly takes place in larger aggregates.

PÁRRAFO 23

100. OTHER PROPERTIES OF THE SOLID are ALSO thought to emerge in CLUSTERS as they grow, although the transition points have rarely been found.

101. GOLD CLUSTERS supported on a substrate will reach the melting point of solid gold only if they contain 1,000 or more atoms, although it is unclear to what extent the melting point is influenced by the substrate.

PÁRRAFO 24

102. Average atomic spacing has been found, through X-ray analysis, to be significantly smaller in TWO-ATOM COPPER CLUSTERS than in the solid metal, with the value converging to that of the solid only in clusters containing more than 50 atoms.

103. YET despite THIS SUBSTANTIAL DIFFERENCE, CLUSTERS as small as 14 copper atoms already exhibit the cubic close-packed pattern characteristic of the solid.

104. Orbital energies of copper, aluminum and silicon CLUSTERS (calculated from the energy at which electrons are ejected after being knocked loose by radiation of known frequencies) do not converge to the solid pattern even in clusters as large as 40 atoms.

105. LARGER CLUSTERS have not been examined IN THIS WAY, in part because it is harder to generate beams containing large numbers of them.

PÁRRAFO 25

106. The conclusion to be drawn from THESE STUDIES is that different physical characteristics of cluster converge with those of solids at different scales.
107. THE SOLID does not emerge all at once, but like the Cheshire cat it fades into view slowly, with the smile appearing first.

PÁRRAFO 26

108. How might the surface chemistry of CLUSTERS be exploited?
109. ONE PROMISING APPLICATION is in industrial catalysis, which is central in petroleum refining (to recover gasoline fractions from heavier distillates), in pollution control (to oxidize or reduce noxious emissions) and in the synthesis of pharmaceuticals.
110. CATALYSIS begins when the surface of catalyst adsorbs, say, molecules of carbon monoxide and nitrogen oxide.
111. THESE MOLECULES THEN drift to «active sites» where bonds are broken and reformed, say to nitrogen and carbon dioxide.
112. THE MOLECULES THUS PRODUCED are desorbed, and the catalyst is freed to repeat the process.
113. The efficacy of A CATALYST depends on its ability to attract reactants strongly enough for adsorption yet hold their end products weakly enough for desorption.
114. [see «BIMETALLIC CATALYSTS», by John H. Sinfelt; SCIENTIFIC AMERICAN, September, 1985].

115. Critical to THE ENTIRE PROCESS is the active site, the geometry mystery for most catalytic reactions.

PÁRRAFO 27

116. CLUSTERS are ideal laboratories for studying active sites because their unfilled bonding capacity makes them adsorb readily and their small size limits the number of possible adsorption geometries.

117. THIS CONSTRAINT ALSO makes them likely sources of highly specific catalysts, which do what they are intended to do and no more.

118. THAT SPECIFICITY is highly prized in industry, because many catalysts speed undesired reactions just as effectively as they speed desired ones.

PÁRRAFO 28

119. Pioneering studies of CLUSTER CATALYSIS were carried out in the early 1980's by the Smalley and Kaldor groups and by a group under the direction of Stephen J. Riley of Argonne National Laboratory.

120. CLUSTER CATALYSIS has since been pursued at the University of California at Los Angeles, the University of Utah and several other institutions.

PÁRRAFO 29

121. The quest for THE MADE-TO-ORDER CATALYST began with simple systems in which clusters of iron, cobalt, niobium or aluminum were tested for their efficacy as adsorbents of hydrogen gas.

122. In many cases, CERTAIN CLUSTER SIZES were immensely more effective than others.
123. Iron, FOR EXAMPLE, adsorbs hydrogen 1,000 times as fast in 10-ATOM CLUSTERS as it does in 17-ATOM CLUSTERS.
124. Kaldor's group showed that ADSORPTION RATES correlate with low ionization potentials, which led to the hypothesis that loosely bound electrons are involved in the adsorption.
125. BUT LATER WORK found that clusters of niobium, for example, adsorbed hydrogen as efficiently when they were ionized as when they were neutral.
126. THAT IS, THEY worked with or without their outermost electrons, which suggests that cluster catalysis depends on shape as well as on bonds.

PÁRRAFO 30

127. THE DISCOVERY THAT small changes in CLUSTER SIZE can produce large differences in adsorptive behavior strengthens the notion that clusters represent a distinct phase of matter.
128. IT ALSO suggests that specifically adsorptive clusters might be chosen by size and deposited on a substrate for industrial catalysis, whereas unreactive clusters might be selectively deposited to form protective coatings.

PÁRRAFO 31

129. SUCH A CAPABILITY would represent a great advance, because most industrial catalysts are still the products of a black art.

130. Now, for the first time, the secrets of CATALYSIS are beginning to yield to the tools of cluster science.
131. Scanning tunneling microscopy, a new technique that enables investigators to take a snapshot of individual atoms in A REACTION, may play an important role in elucidating the interaction between clusters and their substrate.
132. Migration, the process by which CLUSTERS attach to supports and then rearrange themselves, is one phenomenon that may be clarified by SCANNING TUNNELING MICROSCOPY.

PÁRRAFO 32

133. Ernst Schumacher of the University of Bern has approached CLUSTER-SUBSTRATE INTERACTIONS DIFFERENTLY.
134. HE has imprisoned ALKALI-METAL CLUSTERS in larger, hollow molecules called zeolite cages, which prevent the clusters from participating in undesired reactions without interfering with their ability to catalyze the polymerization of ethylene to polyethylene.
135. [see «SINTHETIC ZEOLITES», by George T. Kerr; SCIENTIFIC AMERICAN, July].
136. The extension of THIS WORK to clusters of transition metals promises to provide zeolite catalysts with very specific characteristics.

PÁRRAFO 33

137. FURTHER PROGRESS IN CLUSTER CATALYSIS will depend on the establishment of systematic knowledge.

138. STUDIES must first correlate particular metals and the sizes of individual particles with specific chemical activities.
139. THE NEXT STEP will be to select the proper clusters and deposit them on suitable substrates, perhaps by stacking them in precise, three-dimensional lattices that may support growing molecules, as enzymes do.
140. If successful, A BREAKTHROUGH OF THIS TYPE might greatly advance synthetic chemistry.

PÁRRAFO 34

141. Thin films of CLUSTERS possessing desirable electronic qualities would be of great interest in microelectronics.
142. HERE, TOO, the field is in a preliminary stage of development, but it is possible to envision applications in optical memories, image processing and superconductivity.
143. Given the potential for constructing PARTS from networks of clusters, it may eventually be possible to make electronic devices on a molecular scale.
144. Ultimately A MACHINE might be designed that could serve as a link between solid-state electronics and biological systems, such as systems of neurons.
145. SUCH A LINK might convey data from a television camera to the brain of a blind person.

PÁRRAFO 35

146. THE FIRST STEP is to form semiconducting cluster films about 100 angstroms thick.
147. ATOMS have already been used to make precise crystalline lattices, in a technique known as molecular-beam epitaxy;
148. If a way can be found to use clusters, INSTEAD, as building blocks, then FILMS WITH MORE COMPLEX STRUCTURES might be created.
149. THE TRICK is to smash CLUSTERS against a substrate with enough force to anneal them but not to destroy them.
150. Isao Yamada's group at the Ion Beam Laboratory at Kyoto University has done THIS with CLUSTERS of various materials, such as aluminum, on substrates such as silicon.
151. THE RESULTING FILMS have shown uniform thickness, optical reflectance and resistance to oxidation.

PÁRRAFO 36

152. Recent work in our laboratory indicates that mixtures of metals such as iron and bismuth, which cannot be alloyed in bulk, may be formed into CLUSTERS in the gas phase.
153. If SUCH CLUSTERS could be deposited in films, it would be possible to create a new class of alloys exhibiting valuable hybrid qualities.

PÁRRAFO 37

154. Efforts are now being made to deposit CLUSTERS in thin FILMS that could function as superconductors.
155. We have recently prepared CLUSTERS of yttrium-barium copper oxide, which may be able to form SUCH FILMS.
156. The research, HOWEVER, is still in a nascent stage, and even the most valuable properties of SUCH FILMS cannot yet be exploited commercially because size-selected clusters cannot be produced in quantity.

PÁRRAFO 38

157. CLUSTERS of certain metals have a great ability to absorb light.
158. THIS is caused by the extreme density of THEIR valence electrons, THEIR high surface-to-volume ratio (which puts many electrons near the surface) and the ease with which THEIR electron clouds can be distorted, or polarized.
159. It is possible to predict, on the basis of a given CLUSTER's chemistry and size, which wavelengths of light it will absorb.
160. SUCH CHARACTERISTIC WAVELENGTHS have been established recently for alkali metals by Knight and his group.
161. Because CLUSTERS are so PHOTORECEPTIVE, they can often absorb more than one photon, a useful quality in light-initiated chemical processes.

162. If suspended in a transparent medium, THEY may also make efficient radiation detectors, wavelength-specific light filters or elements in an optical-memory system.
163. Eventually it may be possible to exploit the chemical and optical properties of CLUSTERS to create photographic films possessing new properties.
164. FILM is exposed when a photon hitting a tiny silver halide crystal converts a bit of it into a silver metal cluster.
165. The cluster serves as a catalyst during THE DEVELOPING PROCESS, turning the rest of the crystal into silver metal.
166. If MORE SENSITIVE CLUSTERS - perhaps of different metals - could be created, it might allow the production of faster films.
167. Smaller formations made of suitable clusters could lead to FILMS that can resolve sharper images.

PÁRRAFO 39

168. The great reactivity and precise photon-emission patterns of CLUSTERS are also of value as a chemical fuel for lasers.
169. James L. Gole of the Georgia Institute of Technology has demonstrated that TRIATOMIC SODIUM CLUSTERS react with chlorine to produce excited diatomic sodium in sufficient abundance to create a population inversion, from which the process of stimulated emission yields a coherent beam in the blue-green end of the visible spectrum.

170. THIS COLOR is readily transmitted in water, and therefore, a laser using this fuel could be a new medium for submarine communications.

PÁRRAFO 40

171. In the past decade, CLUSTER researchers have created an interdisciplinary science and have raised fundamental questions about the nature of molecular surfaces.

172. The chemistry of THIS NEW PHASE OF MATTER is still in its infancy, but sufficient knowledge now exists to suggest that it has great relevance to fields as diverse as materials science, electronics and astrophysics.

ANEXO 3
PROGRESS IN GALLIUM ARSENIDE SEMICONDUCTORS

0.1. THE COMPOUND is not a candidate to supplant silicon.

0.2. NEVERTHELESS, ITS SPEED AND OPTICAL CAPABILITIES have spawned fast-growing applications in computing and communications

PÁRRAFO 1

1. TODAY'S GLOBAL AGE OF ELECTRONICS is built on a miniature foundation of microscopic circuits engraved on silicon chips.
2. The current success and continuing promise of SILICON IN CONSUMER, COMMERCIAL, INDUSTRIAL AND MILITARY ELECTRONIC SYSTEMS has prompted those who work with the material to offer a tongue-in-cheek criticism of another promising semiconductor, gallium arsenide.
3. «GALLIUM ARSENIDE», they say, «is the technology of the future, always has been, always will be».

PÁRRAFO 2

4. After almost 30 years as the technology of the future, GALLIUM ARSENIDE has begun to make a place for itself, not by supplanting silicon but by complementing it in new applications.

5. The inherent advantages of THE MATERIAL lie in the speed with which electrons move through it, in weak-signal operations and in the generation and detection of light.
6. THESE ADVANTAGES suit IT for roles in computing, television reception and the optoelectronic transmission of data through optical-fiber networks (a technology also known as photonics).
7. GALLIUM ARSENIDE light-emitting diodes and lasers used in visual-display technologies and audiodisk players already account for more than \$1 billion in sales annually.
8. Hundreds of thousands of satellite-receiving dishes that use GALLIUM ARSENIDE detectors are sold every year, and high-speed circuits using GALLIUM ARSENIDE transistors are projected to reach a similar turnover in a few years.
9. In an economy and society that depend on the rapid exchange of information as well as on the processing of it, many silicon-dominated processors will require a considerable admixture of GALLIUM ARSENIDE components in order to do their jobs.

PÁRRAFO 3

10. GALLIUM ARSENIDE technology has largely followed the course of development charted earlier by workers in silicon.
11. Since the invention of the transistor in 1948 by John Bardeen, Walter H. Brattain and William B. Shockley of Bell Telephone Laboratories, researchers have tried to improve SEMICONDUCTORS in two ways.

12. FIRST, physicists and electrical engineers seek MATERIALS that can switch on and off more quickly and perhaps perform other tasks, such as the detection and generation of light.
13. INDEED, it was toward THESE ENDS that GALLIUM ARSENIDE - which does not occur in nature - was formulated in the 1950's by Heinrich Welker of Siemens Laboratories.
14. HE ALSO investigated closely from elements in the columns of the periodic table adjacent to silicon and germanium, the constituents of the earliest transistors.

PÁRRAFO 4

15. SECOND, ENGINEERS refine the techniques by which semiconductors are manufactured.
16. THIS WORK requires that the semiconductors' chemical and physical traits be specified and that compatible auxiliary materials and processes be developed for the fabrication of insulators, conductors, external connectors and other essential components.
17. SEMICONDUCTORS have to be carefully purified, combined with other substances in precise ratios and formed into perfect crystals;
18. flaws introduced during THE FABRICATION of transistors and circuits must be smoothed away without compromising desired electronic qualities.
19. None of THESE TASKS is easy even now;

20. THEY were harder still in the early years, when a new materials science had to be created from fundamental studies in physics, chemistry, metallurgy and other disciplines.
21. I shall try to guide the reader through THESE INTERTWINING AREAS OF PHYSICS, ENGINEERING, MATERIALS AND ELECTRONICS to show why gallium arsenide is both promising and challenging to bring to market.

PÁRRAFO 5

22. GALLIUM ARSENIDE's most promising property is the great ease with which electrons move through it:
23. when all else is equal, GALLIUM ARSENIDE circuits are faster at equal or lower power than are silicon circuits.
24. Because GALLIUM ARSENIDE consumes less power, IT produces less waste heat that must be drawn from the circuit.
25. THIS QUALITY is particularly valuable because there is a trade-off between A SEMICONDUCTOR's speed and power.

PÁRRAFO 6

26. An engineer must look at the question of SPEED in the context of a device, not a pure crystal of an element or compound.
27. Today SEVERAL KINDS OF TRANSISTOR serve as the essential switching elements in electronic circuitry.

28. Calculations are carried out or data processed by effecting changes in THESE DEVICES.
29. SUCH CHANGES can proceed no faster than the switching speed, the time it takes an electron to traverse the semiconducting region under the control of electrical signals from another part of the circuitry.

PÁRRAFO 7

30. A SEMICONDUCTOR'S SWITCHING SPEED depends on the average velocity it allows an electron to attain -about one million or more centimeters per second- as it encounters numerous obstructions while traveling through a transistor.
31. After many collisions with atoms, ions and each other, THE ELECTRONS acquire a characteristic distribution of velocities that is determined by the electric field driving them and by the way that the residual impurities and the semiconductor's constituent atoms scatter them.
32. ELECTRONS ricochet in all directions, often losing energy in the process, solving their net flow in the direction of the electric field.

PÁRRAFO 8

33. A mechanical analogy helps to explain how physical properties can influence the movement of AN ELECTRON in a semiconductor.
34. TWO DIFFERENT SEMICONDUCTING MATERIALS can be represented by tubes that are lined with stationary and vibrating obstacles and tilted equally with respect to the ground.

35. THE OBSTACLES are the scattering mechanism, the tilt provides a gravitational field that corresponds to an electric field and the balls dropped into the tubes represent electrons.
36. HERE, the switching speed corresponds to the time it takes THE BALLS to reach the bottom of THE TUBES.
37. Electron mobility, ON THE OTHER HAND, is the ease with which THE BALLS evade the obstacles.
38. In part, we can think of THIS NIMBLENESS as if it reflected the size of the balls:
39. A SMALLER, QUICKER BALL hits fewer obstacles.

PÁRRAFO 9

40. In a semiconductor the electrons move through an array of constituent atoms arranged in a crystalline lattice.
41. Because THE CONDUCTION ELECTRONS are shared by all the atoms, THE LATTICE has the electronic character of a single tube for the passage of electrons.
42. Arrays formed by gallium and arsenic ATOMS, shown in the scanning tunneling electron micrograph below, attract MOVING ELECTRONS less strongly than do arrays of silicon atoms.
43. Physicists THEREFORE regard ELECTRONS as having a smaller effective mass in gallium arsenide than they do in silicon.

44. Since OTHER FACTORS are ALSO contributing to higher mobility, it follows that ELECTRONS IN GALLIUM ARSENIDE can generally reach higher velocities over a given distance and travel farther between collisions than can electrons in silicon.

PÁRRAFO 10

45. One might stop scattering altogether by shortening the critical pathways to less than the average distance between ELECTRON COLLISIONS.
46. THAT would ensure that MOST ELECTRONS hurtle through the critical switching area on ballistic paths
47. [see «BALLISTIC ELECTRONS in Semiconductors,» by Mordehai Heiblum and Lester F. Eastman; SCIENTIFIC AMERICAN, February, 1987].
48. BUT practical application of THIS PRINCIPLE is not expected until years after the more conventional gallium arsenide transistors have found their place on the technological menu.

PÁRRAFO 11

49. The ball-and-tube analogy of ELECTRON COLLISIONS pertains only to acceleration under electric fields weaker than 10,000 volts per centimeter.
50. STRONGER FIELDS elicit additional physical interactions that produce so-called saturation as the electrons become effectively heavier;
51. THIS narrows or even reverses gallium arsenide's edge over silicon.

52. IN FACT, GALLIUM ARSENIDE tends to operate at lower optimal voltages than does silicon, making the best circuits of the two kinds of semiconductors hard to connect to one another.
53. VOLTAGE compromises must be made when THE TWO coexist.

PÁRRAFO 12

54. MOBILITY is ALSO important for high frequency, low-noise operation.
55. NOISE, the random fluctuations in voltage that determine the weakest usable signal, can be minimized at high frequencies by maximizing electron mobilities, both in the transistor and in its connections to the rest of the circuit.
56. THE LOWER-NOISE OPERATION of gallium arsenide circuits turns out to be particularly valuable for the detection of television and microwave signals.

PÁRRAFO 13

57. THE OTHER MAJOR SUPERIORITY OF GALLIUM ARSENIDE OVER SILICON lies in the much greater ease with which the separations between its electronic bands, or energy levels, can be engineered.
58. SUCH «BAND-GAP ENGINEERING» can produce versatile optoelectronic capabilities and more flexible transistor designs.
59. AN ELECTRONIC BAND, which defines the range of energies an electron can have, is the broadened form of an energy state of an electron orbit in an individual atom.

60. In a pure semiconductor THE VALENCE BAND (which contains the electrons providing chemical bonding) is essentially filled;
61. THE NEXT HIGHER LEVEL, THE CONDUCTION BAND, is essentially empty.
62. Mobile charges in THESE BANDS are created by a process called doping, which is the precise addition of trace impurities to the host semiconductor.
63. Regions that have electrons IN THE CONDUCTION BAND, called n-type semiconductors, are made by DOPING with atoms that function as electron donors;
64. P-TYPE REGIONS are formed by creating positively charged holes (missing electrons in the valence band).

PÁRRAFO 14

65. The energy difference between the top of THE VALENCE BAND and the bottom of the conduction band is called the band gap.
66. IT is larger in gallium arsenide than in silicon, but IT can be narrowed or widened by judicious substitution (alloying) with other atoms.
67. If aluminum, FOR EXAMPLE, IS FULLY SUBSTITUTED for gallium to create aluminum arsenide, A MUCH WIDER BAND GAP is attained.
68. PARTIAL SUBSTITUTIONS produce band gaps directly proportional to the fraction of aluminum in the alloy.
69. OTHER VALUABLE ALLOYS are created by substituting some indium for gallium, some phosphorus for arsenic, or both at the same time.

PÁRRAFO 15

70. ALLOYS OF ALUMINUM GALLIUM ARSENIDE have spacings between atoms that match those of pure gallium arsenide so closely that the two materials can be fitted together atom by atom without defects.
71. VERY THIN LAYERS OF TWO OR MORE ALLOYS can be alternated to create heterojunctions, structures whose band gaps vary from layer to layer.
72. ONE EXAMPLE is the semiconductor superlattice invented by Leo Esaki and his colleagues at IBM.
73. IN THIS STRUCTURE, alternating layers of aluminum gallium arsenide and gallium arsenide are deposited onto a gallium arsenide substrate.
74. Electrons moving parallel to THE LAYER PLANES IN SUCH A MULTIDECKER SANDWICH would normally be confined to the lower band-gap layers of gallium arsenide.
75. FOR THEM TO MOVE AT RIGHT ANGLES TO THE LAMINATIONS, OR LAYERS, THEY must penetrate or go over the aluminum gallium arsenide band-gap barriers.
76. By varying THE NUMBER, WIDTH AND COMPOSITION OF THE LAYERS, one can manipulate the electronic and physical attributes of the semiconducting heterojunctions.

PÁRRAFO 16

77. Perfect crystal-to-crystal growth is essential in the exploitation of GALLIUM ARSENIDE'S FLEXIBLE BAND GAP.

78. Unfortunately, MANY GALLIUM ARSENIDE ALLOYS that have desirable electronic properties exhibit unsuitable atomic spacings;
79. THEIR CRYSTALLINE LATTICES do not mesh with each other or with gallium arsenide.
80. If TWO MISMATCHED CRYSTALS are laminated, ROWS OF ATOMS are occasionally skipped at the joining faces, creating faults that can propagate through a layer and destroy its electronic usefulness.
81. THIS EFFECT limits the range of substances that can be conjoined.
82. SOME LATTICE MISMATCH can be accommodated by keeping one of the crystalline layers very thin, but this requirement also restricts design.

PÁRRAFO 17

83. Big changes in band-gap size can sometimes be accommodated by employing A DIFFERENT SUBSTRATE.
84. FOR EXAMPLE, INDIUM PHOSPHIDE SUBSTRATES are used in the indium-gallium arsenide-phosphide lasers that are optimal for long-distance optical-fiber communications.

PÁRRAFO 18

85. Sometimes one can avoid DIRECT MISMATCHES between two crystalline layers that have desirable electronic qualities by separating them with specially tailored superlattice buffers.

86. THE BUFFERS are made from various alloys whose crystals have atomic spacings that are intermediate between those of the active layers;
87. THEY gradually absorb the mechanical strain over several layers.
88. THE BUFFERS ALSO can insulate circuits from any residual defects in the gallium arsenide substrate.
89. Greatly improved lasers and transistors have been built using SUPERLATTICE BUFFER LAYERS.

PÁRRAFO 19

90. In 1979 Raymond Dingle and his colleagues at Bell Laboratories demonstrated a design for heterojunction field-effect transistors that placed a gallium arsenide channel UNDER A LAYER OF ALUMINUM GALLIUM ARSENIDE.
91. THEY realized that after a dopant atom IN A GALLIUM ARSENIDE LAYER has donated an electron to the conduction band it becomes a positive ion that will scatter other electrons.
92. SO THE WORKERS physically separated THE DONOR ATOMS from the gallium arsenide by placing DOPANTS in an adjacent layer of aluminum gallium arsenide.
93. ELECTRONS DONATED BY THE DOPANTS move to the lower conduction band of the nearby gallium arsenide layer.
94. THEY THEREFORE move faster than would have been the case had the ionized donor atoms remained in the channel, thus blocking the electron's paths.

95. THIS TECHNIQUE, called modulation doping, was quickly incorporated into gallium arsenide field-effect transistors at Fujitsu Laboratories in Japan and Thomson-CSF in France.
96. IT increases electron mobility by only 20 percent at room temperature.
97. When cooled TO 77 KELVIN (77 DEGREES CELSIUS ABOVE ABSOLUTE ZERO), transistors based on modulation doping offer ABOUT THREE TIMES THE MOBILITY of conventionally doped devices.

PÁRRAFO 20

98. ANOTHER MATERIAL ASPECT OF GALLIUM ARSENIDE that may help speed circuits is the capacity of its wafers to serve as semi-insulators.
99. WAFERS are the substrates on which devices and circuitry are formed.
100. SUBSTRATES of silicon, because of the material's smaller band gap and greater amount of activated residual (unwanted) dopants, are always to some extent electrically conductive, and THEY therefore add capacitance, or electrical drag, that reduces the speed with which electrons traverse a circuit.
101. GALLIUM ARSENIDE'S WIDER BAND GAP allows it to be prepared in semi-insulating form either by keeping the substrates utterly free of active dopants or by incorporating special self-compensating dopants that almost completely cancel the effect of residual dopants.
102. SUCH ADVANTAGES over silicon may not persist at levels of integration beyond several thousand circuits per chip, at which point the capacitance between the numerous closely spaced wires connecting the circuits become the crucial limit to signal speed.

PÁRRAFO 21

103. In addition to electron mobility and band-gap flexibility, GALLIUM ARSENIDE'S THIRD AND MOST DRAMATIC ADVANTAGE OVER SILICON is its capacity to radiate and detect near-infrared radiation.
104. In gallium arsenide the potential energy of an electron moving from the conduction to the valence band can easily be given up as a quantum of ELECTROMAGNETIC RADIATION, or photon.
105. The same reaction in silicon generally requires A NONRADIATIVE REACTION, such as a collision, in order to conserve momentum.
106. THIS DIFFERENCE in band-gap properties explains why gallium arsenide can support optoelectronic functions and silicon cannot.

PÁRRAFO 22

107. A GALLIUM ARSENIDE RADIATION SOURCE consists of a diode in which two regions are oppositely doped, giving the p-type one an abundance of holes (in the valence band) and the n-type one an abundance of electrons (in the conduction band).
108. Voltage applied to SUCH A P/N DIODE injects holes and electrons into the boundary between the two regions, creating excess populations of electrons and holes.
109. When AN ELECTRON AND A HOLE combine, annihilating one another, the ELECTRON'S band-gap energy is released as a photon.

PÁRRAFO 23

110. THIS WONDERFULLY EFFICIENT ELECTRON/HOLE RECOMBINATION (which under certain circumstances can convert most of the electrical energy into light) can be used in a straightforward manner to create a familiar electronic component: the light-emitting diode (LED).

111. LED'S of aluminum gallium arsenide or gallium arsenide phosphorus are seen in many electronic displays as flashing red or yellow dots, respectively.

112. Tens of millions of THEM are made every year.

PÁRRAFO 24

113. A laser diode generates MORE CONCENTRATED RADIATION.

114. The faces of the crystal that forms THE DEVICE are perfectly parallel and act as semitransparent mirrors.

115. Light reflects back and forth through THE RECOMBINATION REGION, where it simulates the emission of radiation that has the same wavelength and directionality.

116. THE RESULTING BEAM is highly coherent.

117. THE ORIGINAL SEMICONDUCTOR DIODE LASERS were made from gallium arsenide p/n junctions in independent experiments at IBM and General Electric in 1962.

118. ADVANCED BAND-GAP ENGINEERED DESIGNS depend on structures containing layers of different compositions.

119. FOR EXAMPLE, GALLIUM ARSENIDE LASERS emit radiation at near-infrared wavelengths because THE BAND GAP OF GALLIUM ARSENIDE corresponds to an energy just below that of visible photons.
120. Alloying GALLIUM ARSENIDE with one or more elements (aluminum, indium, phosphorus) shifts the gap to higher or lower values, pushing the output farther into the infrared or moving it into the visible region.

PÁRRAFO 25

121. EQUALLY IMPORTANT is the capacity of GALLIUM ARSENIDE AND ITS ALLOYS to detect light by reversing the reaction underlying LED's and laser diodes.
122. THE RESULTING PHOTODETECTORS can be tuned to a given wavelength by means of the same band-gap engineering techniques that are used to tune laser diodes.
123. Because GALLIUM ARSENIDE PHOTODETECTORS are so efficient, THEY can respond far faster than silicon ones.
124. THEY have the additional virtue of being easily integrated into high-speed gallium arsenide electronic circuitry.

PÁRRAFO 26

125. SUCH INTEGRATION is a major goal for economic and functional reasons.

126. FIRST, like all miniaturization, IT would greatly reduce the unit costs of the device (allowing a single wafer to produce scores of chips, each containing thousands of circuits).
127. SECOND, by placing A PHOTODETECTOR extremely close to the circuit that first amplifies it (the «front-end» circuit), one can design the connection between THE TWO ELEMENTS so as to minimize the antennalike pickup of unwanted signals from neighboring circuits, called cross talk -a major problem in circuits connected to nonintegrated detectors by conventional wire links.
128. BEYOND THE INTEGRATION OF OPTICAL AND ELECTRONIC FUNCTIONS lies the more speculative prospect of chips in which one optical signal directly modulates another.
129. MANY SUCH DEVICES have been proposed, but ALL are far from realization.

PÁRRAFO 27

130. BESIDES THE ABILITY TO GENERATE AND DETECT LIGHT, other advantages make gallium arsenide the potential technology of choice in specific applications.
131. FOR EXAMPLE, ITS wide range of operating temperatures and great resistance to high-energy radiation make IT valuable for automotive and military applications, respectively.

PÁRRAFO 28

132. It is not enough to identify GALLIUM ARSENIDE'S PROPERTIES and devise ways of exploiting THEM;

133. one must ALSO make THE PRODUCTS THEMSELVES at high quality and low cost.
134. THIS PROBLEM OF MANUFACTURING TECHNOLOGY, to which we now turn, is in many ways the most formidable of all.

PÁRRAFO 29

135. Gallium arsenide, like silicon, FORMS ELECTRONIC ELEMENTS in accordance with rules set by its physical and chemical characteristics.
136. THESE RULES are complicated by the need for many components in an integrated circuit that are not made of semiconductors.
137. AMONG THEM are the metal connectors that link the elements, the insulators that separate them, the resistors and capacitors that control the flow of current and the dopants that supply electrons or holes.

PÁRRAFO 30

138. One of the most serious shortcomings of GALLIUM ARSENIDE AND ITS RELATED ALLOYS is the lack of a usable native oxide, such as that which silicon forms when heated in air.
139. SILICON OXIDE constitutes an electronic and mechanical seal that has a variety of applications.
140. In field-effect transistors, SILICON OXIDE provides the insulation between the gate and the channel.

141. In bipolar transistor circuits, SILICON OXIDE provides insulation between adjacent transistors.
142. SILICON OXIDE can ALSO be exploited as a tool in the fabrication of transistors and circuits on chips;
143. IT provides a protective mask through which windows can be cut to allow reactive chemicals to etch patterns, deposited metal to build conducting films and added dopants to activate particular regions.

PÁRRAFO 31

144. Gallium arsenide technologists INSTEAD must form insulators and masking structures by OTHER, OFTEN LESS CONVENIENT MEANS.
145. A common design for a field-effect transistor places a metal gate directly in contact with GALLIUM ARSENIDE, which produces a controllable channel by means of an effect called Schottky barrier formation.
146. OTHER DESIGNS grow thin crystalline layers of aluminum gallium arsenide as insulator like barriers.
147. Whereas ALUMINUM GALLIUM ARSENIDE provides flexibility for modulation doping, as described above, neither THIS TECHNIQUE nor the Schottky barrier allows the range of operating voltages afforded by silicon oxide insulators.

PÁRRAFO 32

148. ANOTHER MAJOR DISADVANTAGE OF GALLIUM ARSENIDE AND RELATED COMPOUNDS derives from the very fact that they are compounds.

149. Whereas defects in elemental silicon can be annealed by heating the crystal so as to shake any wayward atoms into line, IN GALLIUM ARSENIDE this process competes with the selective vaporization of arsenic.
150. DEFECTS arise from many of the processing steps in the fabrication of integrated circuits.
151. IN PARTICULAR, dopants are typically added by accelerating ions to implant them into THE SEMICONDUCTOR.
152. In the case of silicon THE RESULTING DAMAGE can be removed, and ALL OF THE IMPLANTED DOPANTS can be eased into their proper places in the crystal by annealing the material at nearly 1,000 degrees C for several minutes (during which the silicon oxide coat prevents the dopants from boiling off).
153. BUT ION-IMPLANTED GALLIUM ARSENIDE cannot be annealed so successfully, even when the temperature is kept as low as 800 degrees C.
154. Special precautions to retain THE ARSENIC AND THE DOPANT achieve only partial success:
155. ONLY 90 TO 95 PERCENT OF THE ORIGINALLY IMPLANTED DOPANTS are generally activated.

PÁRRAFO 33

156. NEW TECHNIQUES based on annealing cycles of only a few seconds and special capping layers (which from a seal) are now being tested, but so far no practical method of carrying annealing to completion has been devised for gallium arsenide.

157. THEREFORE, DEVICE CHARACTERISTICS tend to vary across a chip, which, along with other factors, places limits on the level of integration that can be achieved.
158. Whereas A SILICON CHIP OF A SQUARE CENTIMETER can now hold more than a million transistors, THE STATE-OF-THE-ART GALLIUM ARSENIDE CHIP can accommodate only tens of thousands of components.
159. Because the cost of processing A GALLIUM ARSENIDE WAFER is the same as or even more than that of processing a silicon wafer (both of which contain many scores of chips), THIS COMPARATIVELY LOW LEVEL OF INTEGRATION becomes a distinct disadvantage.
160. A FURTHER ECONOMIC HANDICAP is imposed by the smaller size of today's gallium arsenide wafers:
161. usually THEY measure only three to four inches in diameter.
162. SILICON WAFERS currently used in manufacturing have a diameter of five to eight inches.

PÁRRAFO 34

163. Applications of gallium arsenide have been mainly limited to devices for which the relatively high unit cost is affordable because the function is unique.
164. THE SEMICONDUCTOR is most commonly used in front-end, high-speed receivers, in which fast response and low noise are needed, and in optical generation, for which there is no substitute material.

165. APPLICATIONS in digital circuitry are beginning to follow in the highest-performing computers, and there are proposals for the use of gallium arsenide in future microprocessors.

PÁRRAFO 35

166. Perhaps THE MOST FAMILIAR FRONT END APPLICATION of gallium arsenide detectors is seen at the focus of satellite dish antennas.

167. COMMUNICATIONS SATELLITES employ microwaves of up to 12 gigahertz, a spectral region in which gallium arsenide's speed clearly leaves it without peer.

168. Not only can GALLIUM ARSENIDE convert these wavelengths to clear electronic signals, IT can also amplify the weak initial electrical signals almost noiselessly.

169. Silicon amplifiers can switch THAT RAPIDLY only by using transistor connections that add enough noise to drown out the weak signals.

170. The advance of integration should eventually make it economical to expand the use of THESE FRONT-END DEVICES into such commercial products as the television tuners that were recently demonstrated by several companies in Japan and Europe.

171. THESE TUNERS can be expected to deliver clearer pictures in areas where reception is marginal.

PÁRRAFO 36

172. GALLIUM ARSENIDE'S MOST IMPORTANT GROWING APPLICATION is undoubtedly in the photonic transmission of information.

173. Light propagation in fibers can carry MUCH MORE INFORMATION and carry IT farther than can electrical signals in ordinary metal wires.
174. The linking of digital and other systems by OPTICAL FIBERS is increasing at a rapid pace.
175. TRANSCONTINENTAL AND TRANSOCEANIC FIBERS are already in use, and fiber is spreading through the telephone and cable-television systems toward home and office.
176. OPTICAL FIBERS are ALSO being used to extend the distance and speed of computer connections.
177. SUCH LINKAGES will increasingly become part of the digital-processing system itself.
178. Some analysis believe that OPTOELECTRONICS will have as great an effect on society in the coming years as digital computing has had already.

PÁRRAFO 37

179. THE LASER DIODE is to the gas laser as the transistor is to the vacuum tube;
180. THE SAME ANALOGY holds for LED's when compared with incandescent bulbs.
181. IN EACH CASE the semiconductor is smaller, more efficient and cheaper to make and operate than is its bulky analogue.
182. THE MARGIN OF ADVANTAGE is not measured in a few percentage points but in orders of magnitude.

183. THESE DIFFERENCES make possible such new applications as the compact-disk player.
184. THIS CONSUMER PRODUCT employs an aluminum gallium arsenide laser to read data encoded as marks on a rotating disk.
185. AN ALUMINUM GALLIUM ARSENIDE LASER operating at higher power is an essential component of a related device, a computer data-storage unit based on an optical disk.

PÁRRAFO 38

186. SUCH SOLID STATE LASERS are particularly apt candidates for bandgap engineering.
187. THIS TECHNIQUE can be used to control precisely the wavelength that the laser emits.
188. VISIBLE LIGHT IN THE RED WAVELENGTHS is emitted by lasers made from layers of lattice-matched, aluminum-gallium-indium-phosphide grown on gallium arsenide substrates.
189. THESE DEVICES are being tested as replacements for cumbersome gas lasers in such applications as the bar-code scanners that check groceries at cashier counters or automobile parts in factory assembly lines.
190. INDIUM-GALLIUM-ARSENIDE-PHOSPHIDE LASERS are widely used in long-distance communications because their output can be tuned to the infrared wavelengths near 1.3 or 1.55 micrometers, which are the least easily absorbed in optical fibers.

PÁRRAFO 39

191. So far workers in optoelectronics have largely concentrated on improving the operation of DISCRETE DEVICES rather than on integrating THEM into a single unit that can be embodied in a chip.
192. In part, THIS FOCUS is the heritage of the pioneering role played by long-distance telephone companies, which needed the optical links in applications where the unit cost was of secondary importance, because IT could be spread over many telephone conversations.
193. HENCE, COMMERCIAL DEVICES employ separate chips for the lasers, the detectors and the transistors.

PÁRRAFO 40

194. Progressive linking of computers by optical fibers will require LARGE NUMBERS OF MUCH LESS EXPENSIVE OPTOELECTRONIC DEVICES.
195. SUCH DEVICES can be made at affordable unit prices only through techniques of large-scale integration.
196. Optoelectronic links will eventually have to transmit data at one billion bits per second or more, rates that in principle can be achieved by EITHER FIELD-EFFECT OR BIPOLAR GALLIUM ARSENIDE TRANSISTORS.
197. Advanced silicon transistors of the bipolar design can ALSO serve THIS FUNCTION.

198. YET GALLIUM ARSENIDE FIELD-EFFECT DEVICES have become the technology of choice because THEY dissipate less power and can later be extended to still higher operating speeds.

PÁRRAFO 41

199. In 1979 Amnon Yariv and his colleagues at the California Institute of Technology built THE FIRST INTERCONNECTED TRANSISTOR AND LASER ON A GALLIUM ARSENIDE CHIP.

200. Matsushita and NEC Central Research Laboratories in Japan have ALSO made SIMILAR INDIUM-PHOSPHIDE-BASED DEVICES;

201. EXPLORATORY WORK IN VARIOUS COMPOUNDS continues in many other laboratories.

202. THE MAJOR PRACTICAL CHALLENGE consists in overcoming the mismatches between the processing steps by which optimal versions of both the transistors and the lasers can be fabricated on a single chip.

PÁRRAFO 42

203. My colleagues in the advanced gallium arsenide technology laboratory and other IBM facilities, working at three centers in New York State and one in Switzerland, recently built and packaged a trio of CHIPS that transmit one billion bits per second.

204. NONE OF THIS SPEED will go to waste:

205. transmission links must be ABOUT 10 TIMES FASTER than the computers they connect.
206. THAT is because THE LINKS transmit data in series, whereas COMPUTERS process data in eight-bit batches, or bytes (with two bits added to check for errors in transmission).
207. THE FASTEST COMPUTERS already produce a stream of data that outstrips the carrying capacity of copper cable at distances beyond 200 meters (where the closely spaced electrical signals begin to blur.
208. Optoelectronic systems with their vastly greater bandwidth, are replacing CABLE AT PROGRESSIVELY SHORTER DISTANCES;
209. eventually THEY will be used to route information within the computer itself.

PÁRRAFO 43

210. Our circuit is a package consisting of three chips and a connecting bundle of optical fibers.
211. THE FIRST CHIP, a gallium arsenide transmitter, serializes bytes arriving at a rate of 100 million per second and feeds them to the second chip, an aluminum gallium arsenide laser array.
212. ONE OF ITS FOUR LASERS flashes the signal over an optical fiber at one billion bits per second to the third chip, a gallium arsenide receiver, one of whose four built-in electronic photodetectors converts the signal to electronic pulses.

213. THESE PULSES directly feed into gallium arsenide transistors, which amplify them.
214. Other circuits on the receiving chip the deserialize THE SIGNALS into bytes.
215. At either end of the optoelectronic link, the gallium arsenide transmitter and receiver chips connect to silicon circuitry that actually processes THE BYTES as part of a computer.
216. BUT as data-processing rates increase, GALLIUM ARSENIDE can be expected to work its way into the digital circuitry of the systems being interconnected.

PÁRRAFO 44

217. THAT CIRCUITRY lies at the heart of digital computing, a field of paramount importance in which gallium arsenide has found little application to date.
218. MOST COMMON DIGITAL APPLICATIONS require circuits having higher levels of integration - and thus lower unit circuit costs - than gallium arsenide has yet achieved.
219. GALLIUM ARSENIDE'S speed advantage has been exploited only IN SOME «HIGH-END» DIGITAL APPLICATIONS in mainframe computers and supercomputers, which emphasize performance more than cost.
220. (SUPERCOMPUTERS achieve clock speeds of up to 200 megahertz, about six times faster than those of the fastest desk-size machines.)
221. MOREOVER, THESE SPECIALIZED APPLICATIONS give silicon less of an edge in miniaturization, because THE MOST POWERFUL SILICON TRANSISTORS generate so much heat that their density must be carefully limited.

222. CIRCUITS must THEREFORE be scattered over a number of chips, thereby creating a new bottleneck in the form of interchip -transmission delays.
223. Computer engineers try to minimize SUCH DELAYS by packaging related chips closely together.

PÁRRAFO 45

224. Silicon will continue to serve as the stuff of digital computing unless gallium arsenide technology can be pushed to higher levels of INTEGRATION AND PACKAGING COMPATIBILITY.
225. Interchip delays must ALSO be minimized so that any advantages on the level of THE CHIP can be realized in the entire system.
226. Supercomputer projects in Japan and the U.S. are using MODEST LEVELS of gallium arsenide CIRCUIT INTEGRATION AND SOPHISTICATED PACKAGING TECHNIQUES.
227. Clock speeds of as high as 300 megahertz are envisioned FOR THE CRAY-3 SUPERCOMPUTER, THE FIRST OF ITS KIND TO BE BASED ON GALLIUM ARSENIDE.

PÁRRAFO 46

228. Not all the competitive disadvantages of GALLIUM ARSENIDE are technical.
229. Although GALLIUM ARSENIDE TECHNOLOGY has employed many methods that were pioneered in silicon, such as photolithography, THIS ADVANTAGE is offset by the enormous past investment in silicon, which therefore tends to get the nod over gallium arsenide wherever its performance is not notably the worse.

230. FURTHERMORE, because most of the new investment in SEMICONDUCTOR RESEARCH still flows to silicon, THE ESTABLISHED MATERIAL continues to present a formidable moving target.
231. GALLIUM ARSENIDE'S ADVANTAGES in speed, low noise and optoelectronics must become valued enough to overcome the challenge of manufacturing economic unless or until the technology catches up silicon.

PÁRRAFO 47

232. A technological path by which GALLIUM ARSENIDE may one day invade general digital computing is suggested by reduced instruction set computing (RISC), a new technique that speeds processing on chips by using a reduced number of elements to execute specialized functions.
233. Several companies producing workstations have projected the development of RISC to speeds that only GALLIUM ARSENIDE could handle.
234. TODAY'S RISC CHIPS are based on silicon transistors that process about 35 million instructions per second.
235. Existing silicon technology can accommodate a tripling of THIS RATE.
236. SPEEDS OF BEYOND 100 MILLION INSTRUCTIONS PER SECOND can be achieved only by gallium arsenide transistors.
237. Economic feasibility in workstations demands that AT LEAST 40,000 TRANSISTORS be packed on a chip, a level of integration that has already been achieved by several companies in California's «Gallium Gulch»;

238. THE COMPANIES can be expected to market fully validated circuit designs within a year or two.
239. Perhaps THEN, when computers, computer links, televisions and compact disks all contain GALLIUM ARSENIDE, we will be able to say that THE TECHNOLOGY OF THE FUTURE has finally arrived.

ANEXO 4
THE SILICON RETINA

0. A CHIP based on the neural architecture of THE EYE proves a new, more powerful way of doing computations.

PÁRRAFO 1

1. THE EYE is the window through which the mind perceives the world around it.
2. IT IS ALSO A WINDOW THROUGH WHICH to discern the workings of the brain.
3. The retina, a thin sheet of tissue that lines the orb of THE EYE, converts raw light into the nerve signals that the brain interprets as visual images.
4. THIS TINY OUTPOST OF THE CENTRAL NERVOUS SYSTEM must extract all the essential features of the visual scene rapidly and reliably under lighting conditions that range from the dark of a moonless night to the stark glare of the noontime sun.

PÁRRAFO 2

5. THE RETINA's ability to perform THESE TASKS outstrips that of the most powerful supercomputers.
6. YET individual neurons in THE RETINA are about a million times slower than electronic devices and consume one ten-millionth as much power.

7. THEY ALSO operate with far less precision than do digital computers.
8. Understanding how the retina manages THIS FEAT will undoubtedly yield profound insights into the computational principles of other, less accessible regions of the brain.

PÁRRAFO 3

9. Clearly, BIOLOGICAL COMPUTATION must be very different from its digital counterpart.
10. To elucidate THIS DIFFERENCE, we decided to build a silicon chip inspired by the neural architecture and function of the retina.
11. OUR ARTIFICIAL RETINA generates, in real time, outputs that mimic signals observed in real retinas.
12. Our success persuades us that THIS APPROACH not only clarifies the nature of biological computation but also demonstrates that the principles of neural information processing offer a powerful new engineering paradigm.

PÁRRAFO 4

13. CONVENTIONAL ELECTRONIC IMAGE-PROCESSING SYSTEMS bear little resemblance to the human retina.
14. Typically THEY consist of a photosensitive array that delivers signals corresponding to the absolute value of the illumination at each point in an image, backed by a formidable computer that attempts to extract geometric features from the resulting digital data.

PÁRRAFO 5

15. The retina, IN CONTRAST, CONTAINS FIVE LAYERS OF CELLS, through which INFORMATION flows both vertically (from one layer to the next) and horizontally (among neighboring cells in the same layer).
16. The sensing of photons and the processing of THE INFORMATION THEY CONTAIN are inextricably combined.
17. We believe that THIS ARCHITECTURE is crucial to the formation of visual images.

PÁRRAFO 6

18. THE TOP THREE LAYERS OF THE RETINA - photoreceptors, horizontal cells and bipolar cells - are the best understood.
19. THESE OUTER LAYERS are the ones whose organization we have chosen to emulate in the silicon retina.

PÁRRAFO 7

20. THE FIRST LAYER consists of rod and cone cells that convert incoming light to electrical signals.
21. HORIZONTAL CELLS - THE SECOND LAYER - make connections to both photoreceptors and bipolar cells through the triad synapse.
22. EACH HORIZONTAL CELL IS ALSO CONNECTED TO its neighbors by gap junctions through which ions diffuse.

23. The potential of ANY GIVEN HORIZONTAL CELL is THUS determined by the spatially weighted average of the potentials of cells around it.
24. NEARBY CELLS make THE STRONGEST CONTRIBUTION;
25. DISTANT ONES, RELATIVELY LESS.

PÁRRAFO 8

26. EACH BIPOLAR CELL receives inputs from a photoreceptor and a horizontal cell and then produces a signal proportional to the difference between the two.
27. Information from THE BIPOLAR CELL passes through the amacrine cell layer to the ganglion cells and thence toward the optic nerve.

PÁRRAFO 9

28. The most crucial function of THE FIRST THREE LAYERS is adaptation.
29. THE PHOTORECEPTORS, HORIZONTAL CELLS AND BIPOLAR CELLS take widely varying amounts of incoming light and ADAPT their response to produce a signal with a much narrower dynamic range that nonetheless captures the important information in a scene.
30. ADAPTATION is necessary if the system is to respond sensitively to small local changes in the image against a background whose intensity may vary by a factor of a million from midnight to high noon.

PÁRRAFO 10

31. The retina copes with THIS TREMENDOUS RANGE in several stages.
32. THE FIRST BIOLOGICAL TRICK is to use two different kinds of receptors:
33. RODS are sensitive to low light levels and CONES to higher ones.
34. FURTHERMORE, THE CONES THEMSELVES can alter the range of light intensities to which they respond, depending on the average long-term brightness in a scene.
35. (THESE ADAPTIVE MECHANISMS explain why people stepping into bright sunlight from semidarkness experience the scene as washed out and overexposed).

PÁRRAFO 11

36. THE BIPOLAR CELLS have a narrower dynamic range than either THE RODS OR THE CONES.
37. The crucial element in enhancing THEIR RESPONSE to the important elements in an image is the triad synapse.
38. THE TRIAD SYNAPSE mediates feedback between the horizontal cells and the cones.
39. AS A RESULT, THE BIPOLAR CELL does not have to respond to the absolute brightness of the scene;

40. IT RESPONDS only to the difference between the photoreceptor signal and the local average signal as computed by the horizontal cell network.

PÁRRAFO 12

41. IN ADDITION, BOTH THE PHOTORECEPTORS AND THE HORIZONTAL CELLS produce logarithmic signals, so that the output of the bipolar cell - the difference between the two - actually corresponds to the ratio of local light intensity to background intensity, irrespective of the absolute light level.
42. Performing FURTHER VISUAL PROCESSING in terms of the intensity ratio enables the retina to see detail in shaded and bright areas within the same scene.

PÁRRAFO 13

43. THIS LOCAL ADAPTATION does not just ensure reliable signaling of small changes in image brightness.
44. IT ALSO suppresses features of images that are not of interest while enhancing those that are.
45. LARGE, UNIFORM AREAS produce only weak visual signals because the impulses from any single photoreceptor are essentially canceled by the spatial average signal from the horizontal cell network.
46. EDGES, IN CONTRAST, produce strong signals because receptors on both sides of the edge sense light levels significantly different from the local average.

PÁRRAFO 14

47. THE RELATIVELY SLOW TEMPORAL RESPONSE OF THE HORIZONTAL CELL NETWORK ALSO enhances the visual system's response to moving images.
48. Photoreceptors produce signals from the image of A MOVING OBJECT while the horizontal cell signal against which they are compared is still reporting the previous intensity level.
49. Unlike a camera, which produces a single snapshot of AN IMAGE, THE RETINA devotes itself largely to reporting changes.

PÁRRAFO 15

50. By the mid-1980s neuroscientists had learned enough about THE OPERATION OF NERVES AND SYNAPSES to know there is mystery to what they do.
51. In no single instance is there a function, done by A NEURAL ELEMENT that cannot, from the point of view of a systems designer, be duplicated by electronic devices.
52. Our goal in building A SILICON RETINA was not to reproduce the biology to the last detail but rather to create a simplified version that contains the minimum structure needed to mimic the biological function.

PÁRRAFO 16

53. Each pixel of OUR MODEL RETINA consists of three parts: a photoreceptor, horizontal cell connections and a bipolar cell.

54. THE PHOTORECEPTOR includes both a photosensitive element and a feedback loop that mimics the slow adaptive mechanism of cones in the biological retina.
55. THE PHOTOSENSOR, a bipolar transistor, produces a current proportional to the number of photons it absorbs.
56. THE FEEDBACK LOOP amplifies the difference between the instantaneous photocurrent and its long-term average level.
57. The output voltage of THIS CIRCUIT is proportional to the logarithm of the light intensity.

PÁRRAFO 17

58. At its utmost sensitivity, THE PHOTORECEPTOR can form images from light fluxes of about 100,000 photons per second - about the intensity of light from a moonlit scene focused on the chip through a standard camera lens.
59. (THAT is ALSO near the low end of the operating range of vertebrate retina cones.)
60. LARGE CHANGES IN INTENSITY saturate the photoreceptor response until it has adapted to the new light level.

PÁRRAFO 18

61. To imitate the horizontal cells, we built a simple hexagonal network of resistors and capacitors.

62. Each node in THE NETWORK is linked to a single photoreceptor and, through identical variable resistors, to its six neighboring nodes.
63. THE CAPACITORS correspond to the charge storage capacity of horizontal cell membranes, whose fine branching present a large surface for storing ionic charge from the extracellular fluid.
64. THE RESISTORS, MEANWHILE, model the gap junctions that couple adjacent horizontal cells in the vertebrate retina.

PÁRRAFO 19

65. The voltage of EACH NODE IN THE HORIZONTAL CELL NETWORK THEREFORE presents a spatially weighted average of the photoreceptor inputs to the network.
66. By varying the value of THE RESISTOR, we can modulate the effective area over which signals are averaged
67. - the greater THE RESISTANCE, the smaller the area over which the signals can spread-.
68. THE HORIZONTAL CELLS also feed back to THE PHOTORECEPTORS and reduce their response to areas of uniform intensity.

PÁRRAFO 20

69. The final output of each pixel in the silicon retina comes from an amplifier that senses the voltage difference between THE OUTPUT OF A PHOTORECEPTOR UNIT AND THE CORRESPONDING NODE IN THE HORIZONTAL CELL NETWORK.

70. The behavior of THIS AMPLIFIER resembles that of the vertebrate bipolar cell.

PÁRRAFO 21

71. THE RESULT is a semiconductor chip containing roughly 2,500 pixels - photoreceptors and their associated image-processing circuitry - in a 50-by-50 array.

72. THE RETINA CHIP ALSO incorporates wiring and amplifier circuits that enable us either to study the output of each pixel individually or to scan the outputs of all the pixels and feed them to a television monitor, which displays the image processed by the entire array.

73. (THE RETINA has gone through about 20 iterations, each requiring a few months for the chip's design and fabrication.

74. IT continues to evolve and to generate new, special-purpose designs to test particular hypotheses about image formation.)

PÁRRAFO 22

75. The behavior of THE ADAPTIVE RETINA is remarkably similar to that of biological systems.

76. We FIRST examined how THE OUTPUT OF A SINGLE PIXEL responds to changes in light intensity when the surrounding cells are at a fixed background illumination.

77. THE SHAPE OF THE RESPONSE CURVE is similar to that of bipolar cells in the vertebrate retina.
78. IN ADDITION, changes in the background illumination alter the potential of the horizontal cell network so that the response curve of the silicon retina shifts in the same manner as IN BIOLOGICAL RETINAS.

PÁRRAFO 23

79. THE SILICON RETINA ALSO has a temporal response that closely resembles that of bipolar cells.
80. When the intensity of light is suddenly increased, there is A LARGE JUMP IN OUTPUT VOLTAGE, equal to the difference between the new input and the previous average voltage stored in the resistive network.
81. THE RESPONSE THEN settles down to a plateau as the network computes a new average voltage.
82. When the light is suddenly decreased to its original intensity, the output voltage plunges below its original value because THE NETWORK now has A LARGER AVERAGE POTENTIAL than it had originally.
83. FINALLY, as THE NETWORK returns to THE ORIGINAL AVERAGE VALUE, the output also returns to its former state.
84. In a biological retina the slow response of THE HORIZONTAL CELLS ensures that rapid fullfield changes in intensity - which might correspond to the shadow of a predator passing over an animal - pass through the bipolar cells without attenuation.

PÁRRAFO 24

85. IN SUBSEQUENT TESTS, we found our silicon retina to be subject to many of the same optical illusions that humans perceive.
86. THE MOST OBVIOUS ILLUSION is that of simultaneous contrast:
87. a gray square appears DARKER WHEN PLACED AGAINST A WHITE BACKGROUND THAN WHEN PLACED AGAINST A BLACK BACKGROUND.
88. OTHER ILLUSIONS include the Mach bands (apparent bright and dark bands adjacent to transitions from dark to light) and the Herring grid, in which gray spots appear at the intersection of a grid of white lines.

PÁRRAFO 25

89. SUCH OPTICAL ILLUSIONS provide important insight into the biological retina's role in reducing the bandwidth of visual information an extracting only the essential features of the image.
90. THE ILLUSIONS are created because the retina selectively encodes visual information.
91. That our retinal model also sometimes generates AN ILLUSORY OUTPUT gives us additional confidence in our interpretation of the principles by which the biological retina operates.

PÁRRAFO 26

92. THE BEHAVIOR OF THE ARTIFICIAL RETINA demonstrates the remarkable power of the analog computing paradigm embodied in neural circuits.
93. THE DIGITAL PARADIGM DOMINATING COMPUTATION today assumes that information must be digitized to guard against noise and degradation.
94. IN A DIGITAL DEVICE, voltages within a certain range are translated into bits having a value of, say, one, whereas voltages within a different range are translated into zeros.
95. EACH DEVICE along the computational pathway restores THE VOLTAGES TO THEIR PROPER RANGE.
96. DIGITIZATION imposes precision on an inherently imprecise physical system.

PÁRRAFO 27

97. A neuron, IN CONTRAST, is AN ANALOG DEVICE:
98. ITS COMPUTATIONS are based on smoothly varying ion currents rather than on bits representing discrete ones and zeros.
99. YET NEURAL SYSTEMS are superbly efficient information processors.
100. ONE REASON is that NEURAL SYSTEMS work with basic physics rather than trying constantly to work against it.

PÁRRAFO 28

101. Although NATURE knows nothing of bits, Boolean algebra or linear systems theory, A VAST ARRAY OF PHYSICAL PHENOMENA implement important mathematical functions.
102. The conservation of charge, FOR EXAMPLE, dictates that electric currents WILL ADD AND SUBTRACT.
103. Thermodynamic properties of ions cause the current flowing into a cell to be AN EXPONENTIAL FUNCTION of the voltage across the membrane.

PÁRRAFO 29

104. Working with physics helps to explain why the most efficient digital integrated circuits envisioned will consume about 10^{-9} joule per operation, whereas neurons expend only 10^{-16} joule.
105. IN DIGITAL SYSTEMS, data and computational operations must be converted into binary code, a process that requires about 10,000 digital voltage changes per operation.
106. Analog devices carry out THE SAME OPERATION in one step and so decrease the power consumption of silicon circuits by a factor of about 10,000.

PÁRRAFO 30

107. EVEN MORE IMPORTANT, HOWEVER, the capacity of ANALOG NEURAL CIRCUITS to operate in unpredictable environments depends on their ability to represent information in context.

108. THEY respond to differences in signal amplitude rather than to absolute signal levels, thus largely eliminating the need for precise calibration.
109. The context for A NEURAL SIGNAL may be the local average light intensity - as it is when a photoreceptor signal is balanced against the signal from the horizontal cell network at a triad synapse.
110. OR IT may be the previous behavior of A NEURAL CIRCUIT itself, as in the long-term adaptation of a photoreceptor to changing light levels.
111. THE CONTEXT OF A SIGNAL may ALSO be some more complex collection of neural patterns, including those that constitute learning.

PÁRRAFO 31

112. THE INTERPLAY OF CONTEXT AND ADAPTATION is a fundamental principle of the neural paradigm.
113. IT ALSO imposes some interesting constraints on neurally inspired circuits.
114. Because only changes and differences convey information, constant change is a necessity for NEURAL SYSTEMS - rather than a source of difficulty, as it is for digital systems.
115. When showing an image to THE DIGITAL RETINA, FOR EXAMPLE, we must constantly keep it in motion, or the retina will adapt and no longer perceive it.
116. THIS REQUIREMENT FOR CHANGE firmly situates a neural circuit in the world that it observes, in contrast to digital circuits, whose design implicitly assumes separation between the system and the outside world.

PÁRRAFO 32

117. We have taken the first step in simulating THE COMPUTATIONS DONE BY THE BRAIN TO PROCESS A VISUAL IMAGE.
118. **How readily can THIS STRATEGY be extended to OTHER TYPES OF BRAIN COMPUTATIONS?**
119. It may seem that the essentially two-dimensional nature of today's integrated circuits would severely limit EFFORTS TO MODEL neural tissue.
120. BUT many parts of the central nervous system are IN FACT thin sheets that carry TWO-DIMENSIONAL REPRESENTATIONS of computationally relevant information.
121. The retina is merely THE MOST OBVIOUS EXAMPLE.
122. FURTHERMORE, IN BOTH NEURAL AND SILICON SYSTEMS, the active devices - be they synapses or transistors - occupy no more than 1 or 2 percent of the space;
123. «wire» occupies THE REMAINING AREA.
124. One can be sure, THEREFORE, that THE LIMITATION OF CONNECTIVITY has forced the design of many parts of the brain into a highly specific form.

PÁRRAFO 33

125. SPECIALIZED WIRING PATTERNS are one clear adaptation to situations in which the number of processing elements is limited by the total amount of wire needed to accomplish a computation.

126. THE BRAIN'S WIRING, FOR INSTANCE, ensures that closely related information is mapped onto neighboring groups of neurons.
127. AS AN EXAMPLE, the cortical areas that perform the early processing of visual information preserve the spatial relations of the image.
128. THIS MAP-LIKE ORGANIZATION OF THE CORTEX allows most of the brain's wiring to be short and highly shared.
129. SIMILARLY, we designed the silicon retina so that the resistors of the horizontal cell network implement computations for the entire circuit, not just the immediately adjacent cells.

PÁRRAFO 34

130. The future development of THE SILICON RETINA and similar neurally inspired chips leads along two potentially divergent paths.
131. ONE is the development of the improved machine vision.
132. A SINGLE CHIP CONTAINING AN ARRAY OF RELATIVELY SIMPLE ANALOG CIRCUITS, after all, can perform the same functions as a multiple-chip system containing an image sensor and many powerful microprocessors and large memory chips.
133. Some work is already in progress toward binocular circuits -SIDE-BY-SIDE SILICON RETINAS that can determine the distance of objects in a scene.

PÁRRAFO 35

134. Real vision (or something somewhat closer to it than what exists now) will probably require RETINA CHIPS containing perhaps
100. times more pixels as well as additional circuits that mimic the movement-sensitive and edge-enhancing functions of the amacrine and ganglion cells.
135. Ultimately SUCH SYSTEMS will also incorporate additional neural circuits to recognize the patterns that the retina generates.

PÁRRAFO 36

136. ANOTHER PATH will take researchers toward a grander objective: understanding the brain.
137. For years, biologists have tacitly assumed that when they have understood the operation of each molecule in a nerve membrane, they will understand the operation of THE BRAIN.
138. BUT both the digital and the analog paradigms of computation make it clear that THIS ASSUMPTION is wrong.
139. AFTER ALL, A COMPUTER is built from a completely known arrangement of devices whose operation is understood in minute detail.
140. YET it is often impossible to prove that even A SIMPLE COMPUTER PROGRAM will calculate its desired result or, for that matter, whether the computation will even terminate.

PÁRRAFO 37

141. No matter how well the brain's architecture IS MAPPED OUT, such mapping alone will not lead to a global view of the principles and representations on which the nervous system is organized.
142. THE INTERACTIONS OF THE COMPUTATIONS are simply too complex.
143. If, HOWEVER, workers can build SILICON SYSTEMS according to a deliberate and well-defined biological metaphor, they may be able to test and advance researchers' understanding of the nervous system.

PÁRRAFO 38

144. The success of THIS VENTURE can create a bridge between neurobiology and the information sciences, and it will also greatly deepen the understanding of computation as a physical process.
145. IT will give rise to an entirely new view of information processing that harnesses the power of analog collective systems to solve problems that are intractable by conventional digital methods.

ANEXO 5 MICROLASERS

0. MILLIONS OF LASERS JUST A FEW MILLIONTHS OF A METER can now be etched on a single chip, offering a host of novel applications in optical communications and information processing

PÁRRAFO 1

1. Investigators have long dreamed of building AN OPTICAL COMPUTER.
2. ELECTRONIC SWITCHES AND CIRCUITS would be replaced by a network of light through which individual impulses carry and process information.
3. THE IDEA is not only aesthetically appealing but also offers the promise of a machine that would be even faster and more versatile than the most powerful computer in use today.

PÁRRAFO 2

4. The realization of THE DREAM, HOWEVER, has been thwarted by the lack of sufficiently tiny optical-signal processing devices.
5. Like its electronic counterpart, the transistor, THE BASIC BUILDING BLOCK OF ANY OPTICAL PROCESSING OR COMMUNICATIONS SYSTEM must operate at low power and at high speed, and to do so it must be small.

6. In the microelectronics industry, TRANSISTORS having dimensions smaller than a micron (a millionth of a meter) are now routinely fabricated in numbers approaching tens of millions on a single semiconductor chip.
7. COMPARED WITH THIS ASTONISHING FEAT, the miniaturization of optical devices has lagged considerably.

PÁRRAFO 3

8. The current state of affairs in COMMERCIALLY AVAILABLE OPTICAL TECHNOLOGY is embodied by a device called the semiconductor diode laser, which is found in everything from compact-disc players to fiber-optic communications systems.
9. Although THE DIODE LASER has revolutionized the storage and communication of information, the size of THE DEVICE AND ITS degree of integration are roughly comparable to that of the individually packaged transistors found in a late 1950s radio.
10. A TYPICAL DIODE LASER measures a few microns wide by several hundred microns long -making it several hundred times bigger than one of its microelectronic counterparts.
11. Although SUCH A DEVICE is orders of magnitude smaller than the familiar red helium-neon laser commonly used in supermarket bar-code scanners, IT is simply too big to be useful in an optical computer.

PÁRRAFO 4

12. Very recently, significant advances have been made in the miniaturization of DIODE LASERS.
13. In May 1989, in work that evolved from efforts to construct two-dimensional arrays of optical switches in hopes of eventually building optical computers, we fabricated MORE THAN ONE MILLION MICROLASERS, OR MICRON-SIZE LASERS, on a single semiconductor chip about seven millimeters wide by eight millimeters long.
14. THE MICROLASERS were proposed by one of us (Jewell) and Sam McCall of AT&T Bell Laboratories.
15. THEY were created at Bell Communications Research (Bellcore) by the other two of us and Leigh Florez.
16. THE DEVICES range in size from one to five microns.

PÁRRAFO 5

17. SUCH A SCALE is already two orders of magnitude smaller than that of conventional diode lasers.
18. With additional work, THE SIZE can probably be brought down by another order of magnitude.
19. Perhaps most exciting, as the microlaser approaches ITS PRACTICAL LOWER LIMIT IN SIZE (probably between one half and one quarter of a micron), it is believed that the quantum mechanical process of light emission can be radically altered in a way that will further enhance the performance of the device.

PÁRRAFO 6

20. MICROLASERS are so new that at this time no one can predict whether they will make a significant impact on the commercial market.
21. MOREOVER, the development of an optical computer is far from an easy task
22. (see «THE OPTICAL COMPUTER», by Eitan Abraham, Colin T. Seaton and S. Desmond Smith; SCIENTIFIC AMERICAN, February 1983).
23. NEVERTHELESS, microlasers have generated enormous excitement for their potential applications in OPTICAL COMMUNICATIONS AND INFORMATION PROCESSING in general.

PÁRRAFO 7

24. The principles of operation underlying A DIODE LASER are the same as those for any laser.
25. Atoms in a part of THE LASER called the amplifying medium -typically a solid, liquid or gas- are pumped, or energized, either electrically or with a source of electromagnetic radiation.
26. When a light wave of a specific wavelength traveling through THE AMPLIFYING MEDIUM encounters a pumped atom, it can induce the atom to release its energy in the form of a light wave at the same wavelength.
27. THE PROCESS is coherent, which is to say that the crests and troughs of the waves match up, and the intensity of the light increases.

28. Mirrors on each end of the amplifying medium form a cavity, and they force THE LIGHT to bounce back and forth many times through the medium, maximizing the increase in intensity.
29. The reflectivity of one or both of THE MIRRORS is less than unity, with the result that some of the intensified light is able to escape from the cavity in the form of a laser beam.

PÁRRAFO 8

30. In a diode laser THE AMPLIFYING MEDIUM is a long, brick-shaped diode, a device that permits electric current to flow freely in one direction but blocks the flow of current in the other.
31. THE DIODE is made from a semiconducting material such as gallium arsenide.
32. THE AMPLIFYING MEDIUM OF A CONVENTIONAL DIODE LASER is about as long as the laser itself.
33. Mirrors are formed on each end of THE «BRICK» by simply cleaving the wafer:
34. EACH INTERFACE BETWEEN THE SEMICONDUCTOR AND AIR has a 30 percent reflectivity, which is more than sufficient for operation.
35. When an electric current is made to flow parallel to THE MIRRORS, THE DIODE fills with electrons and holes (parts of the semiconductor lacking electrons).
36. A SHORT TIME LATER THE ELECTRONS AND HOLES recombine, and when THEY do, THEY emit light.

37. THE LIGHT is intensified by multiple reflections through the semiconductor, and a portion of it emerges from one of the mirrors in the form of a laser beam parallel to the underlying wafer substrate;
38. THAT IS, THE BEAM comes out of the edge.

PÁRRAFO 9

39. One characteristic that makes a microlaser so very different from A CONVENTIONAL DIODE LASER is that the laser beam emerges perpendicular, instead of parallel, to the wafer substrate.
40. Instead of the brick-shaped appearance of A CONVENTIONAL DIODE LASER, a microlaser looks like a tiny Coke can;
41. The laser beam shoots out of THE TOP (OR OUT OF THE BOTTOM through the transparent wafer on which it has been grown).
42. THE DIFFERENCE IN GEOMETRIC CONSTRUCTION means that more lasers per area can be packed on a wafer.
43. Kenichi Iga and his colleagues at the Tokyo Institute of Technology first demonstrated the feasibility of SUCH A SURFACE-EMITTING (INSTEAD OF EDGE-EMITTING) APPROACH in the late 1970s.

PÁRRAFO 10

44. Our own work in microlasers dates about the time of IGA'S BREAKTHROUGH.

45. Investigators at Bell Labs built SURFACE-EMITTING LASERS by sandwiching films of gallium arsenide that measured from one eighth of a micron to a few microns thick between mirrors and gluing the entire stack together.
46. To sensible people, the notion of turning SUCH A PROCEDURE into a practical technology was silly;
47. FABRICATION bordered on black magic, and THE DEVICES were of poor quality.
48. (OF COURSE, the first transistors also had THESE «ATTRIBUTES.»)

PÁRRAFO 11

49. STEADY IMPROVEMENTS turned the tide.
50. A microlaser, including mirrors, is now typically about six microns long, compared with the 250-micron length of a conventional diode laser.
51. BUT what actually makes A MICROLASER «micro» is that its Coke-can geometry serves as a waveguide: an optical «hose» that prevents light from spreading outward as it propagates.
52. (An optical fiber is a well-known example of A WAVEGUIDE.)
53. The typical diameter of A MICROLASER, as we mentioned earlier, is a few microns.

PÁRRAFO 12

54. Even though MICROLASERS are still in their infancy, THEIR small size makes their power requirements comparable to those of the more mature conventional diode lasers.
55. An important yardstick used to characterize THE POWER REQUIREMENTS OF ANY DIODE LASER is the threshold current, the flow of electric current needed to make the diode just barely lase.
56. The lowest THRESHOLD of a microlaser is 0.7 milliampere, compared with the 0.5-milliampere threshold of a conventional diode laser.
57. With additional work, it is hoped that THE THRESHOLD OF A MICROLASER, because of its exceptionally small size, can be lowered to a few millionths of an ampere.
58. At present, MICROLASERS ALSO fall somewhat short of conventional diode lasers in their bit rates -the number of zeros and ones that can be generated per second.
59. AT A BIT RATE of five billion per second, MICROLASERS are not quite as fast as the best diode lasers, but rates approaching 100 billion per second are expected to be achieved eventually.

PÁRRAFO 13

60. **How are SUCH EXQUISITELY SMALL, HIGH-PERFORMANCE LASERS made?**
61. Two crucial techniques make IT possible.

62. THE FIRST TECHNIQUE, molecular-beam epitaxy, allows the basic material of each laser to be built up from layers of semiconducting materials added one at a time.
63. INDIVIDUAL LASERS numbering in the thousands or millions can THEN be stamped out simultaneously by means of deep vertical etching, in conjunction with conventional photolithographic patterning.

PÁRRAFO 14

64. Conceptually, MOLECULAR-BEAM EPITAXY is quite straightforward.
65. A SEMICONDUCTOR CRYSTAL is placed in a vacuum.
66. Containers are filled with each of the chemical elements, such as indium, gallium, aluminum and arsenic, that will be used to build the desired semiconductor layers on top of THE SUBSTRATE.
67. When AN INDIVIDUAL CONTAINER is heated to the proper temperature, the element within IT begins to evaporate, streaming out the open end of the container and into the vacuum in much the way that steam escapes out the hole of a heated teapot.
68. THE RESULT is a wide beam of molecules that sprays in the direction of the wafer.
69. When desired, EACH BEAM OF MOLECULES can be blocked by a mechanical shutter.

PÁRRAFO 15

70. The formation of multiple layers of different semiconductor materials is THEN accomplished by simply determining which chemical elements should be in which layer and opening THE APPROPRIATE SHUTTERS.
71. FOR EXAMPLE, layers of aluminum arsenide are formed BY OPENING THE ALUMINUM AND ARSENIC SHUTTERS simultaneously while keeping all the other shutters closed;
72. SIMILARLY, LAYERS OF GALLIUM ARSENIDE are formed BY OPENING THE GALLIUM AND ARSENIC SHUTTERS.
73. The thickness of EACH LAYER is determined by how long THE SHUTTERS are held OPEN.
74. Molecular-beam epitaxy is such a refined technique that it is possible to grow AN INDIVIDUAL LAYER HAVING THE THICKNESS OF A SINGLE ATOM.

PÁRRAFO 16

75. A typical microlaser may consist of MORE THAN 500 INDIVIDUAL LAYERS.
76. To minimize the power required by THE LASER, one makes that amplifying medium quite thin, about a hundredth of a micron.
77. The fact that IT IS SO THIN means that for THE LASER to work, light must bounce back and forth many more times than it must for a conventional diode laser.

78. AS A CONSEQUENCE, THE MIRRORS must have a much higher reflectivity than the 30 percent reflectivity of the conventional diode laser.

79. IN FACT, THE REFLECTIVITY must be 99 percent or more.

PÁRRAFO 17

80. SUCH A HIGH REFLECTIVITY is attained by depositing in alternate layers two semiconductors, such as gallium arsenide and aluminum arsenide, that have different indices of refraction

81. THAT IS, LIGHT travels at different speeds through THEM.

82. THE DIFFERENCE IN THE INDICES gives rise to a partial reflection at each interface, just as the difference in the indices of glass and air causes a partial reflection from a window.

83. Although THE REFLECTION FROM EACH INTERFACE is only about 0.6 percent, A TOTAL REFLECTIVITY OF GREATER THAN 99 PERCENT can be achieved by stacking many alternate layers of the proper thickness.

PÁRRAFO 18

84. Ironically, THEN, THE BULK OF A MICROLASER consists not of the approximately hundredth-micron-thick section containing the amplifying medium but rather of the mirrors, which together are four or five microns thick.

85. THE RELATIVE THICKNESS of the mirrors is well justified, HOWEVER, because an entire array of microlasers -mirrors and all- can be grown at once, instead of being painstakingly fabricated in the series of steps required to make a diode laser.

PÁRRAFO 19

86. Just as important as THE ABILITY OF MOLECULAR-BEAM EPITAXY TO FORM AN ENTIRE MICROLASER IN ONE STEP is the precision with which it can form the thickness of each layer.

87. *Careful control of LAYER THICKNESS is particularly important in fabricating the mirrors.*

88. The technique for achieving THE NECESSARY CONTROL is based on the fact that an individual atomic layer becomes progressively rougher as it grows, until about half of it is in place.

89. THEN THE LAYER begins TO BECOME PROGRESSIVELY SMOOTHER until, when it is completely in place, it is atomically smooth.

PÁRRAFO 20

90. One can determine how SMOOTH A SURFACE is by bouncing a beam of high-energy electrons off it:

91. THE SMOOTHER THE SURFACE, the more easily the electrons are reflected and detected on a screen on the other side.

92. HENCE, the intensity of THE REFLECTED BEAM oscillates in time as successive layers are grown.
93. Accurate measurement of THE FREQUENCY OF THE OSCILLATION can precisely determine the time to deposit a single layer of atoms.
94. THE RESULTING EXACT KNOWLEDGE OF THE DEPOSITION RATE can THEN be used to strictly control the layer's thickness.
95. Timing of the mechanical shutters with a computer provides PRECISE REGULATION.

PÁRRAFO 21

96. ANOTHER ADVANTAGE OF MOLECULAR-BEAM EPITAXY is that it enables one to modulate the electrical conductivity and reflectivity of the mirrors.
97. THE ELECTRIC CURRENT for pumping the diode must pass THROUGH THE MIRRORS, but unfortunately, the current does not flow easily in this instance.
98. THE ELECTRICAL AND OPTICAL PROPERTIES cannot be optimized simultaneously, and so microlasers must be designed to accommodate the two competing demands as best as possible.

PÁRRAFO 22

99. Once the wafers have been grown, conventional techniques for transferring patterns are used to carve the wafers into INDIVIDUAL MICROLASERS.

100. An etch mask, consisting of a two-dimensional array of disks of etch-resistant material, is deposited ON THE WAFER SURFACE by vapor deposition and photolithography, a printing process that uses plates made according to a photographic image.
101. THEN, IN A NOVEL ETCHING STEP, a collimated beam of xenon atoms, guided BY THE DEPOSITED MASK, vertically etches out each Coke can-shaped microlaser.
102. THE RESULTING SIDEWALLS are smooth, and the surface damage is minimal.

PÁRRAFO 23

103. Our group at Bellcore has used THESE ADVANCED TECHNIQUES to make arrays of microlasers in which a few layers of one of the mirrors were deliberately varied in thickness.
104. CONSEQUENTLY, the wavelength of EACH LASER differs slightly from that of its neighbor -by an evenly spaced amount.
105. SUCH ARRAYS could have a major impact in the field of fiber-optic communications, where it is desirable to send multiple signals, each at a unique wavelength, down a single fiber.

PÁRRAFO 24

106. The Bellcore group has ALSO made ENTIRE ARRAYS OF MICROLASERS that can be turned on and off by light pulses.

107. THE ARRAYS could be incorporated in information-processing machines that operate by parallel processing, in which elements of a problem are solved simultaneously rather than in sequence
108. (see «ADVANCED COMPUTER ARCHITECTURES», by Geoffrey C.Fox and Paul C.Messina; SCIENTIFIC AMERICAN, October 1987).
109. RELATED EFFORTS at Nippon Electric Corporation, The University of California at Santa Barbara and Sandia National Laboratories, among others, are ALSO meeting with success.

PÁRRAFO 25

110. FUTURE WORK IN MICROLASERS is likely to take two paths.
111. FIRST, THE PRESENT GENERATION OF MICROLASERS has an output at wavelengths of approximately one micron (infrared radiation).
112. It would be desirable to increase THE OUTPUT WAVELENGTH to the region ranging from 1.3 to 1.5 microns, because these wavelengths are transmitted with the fewest losses in an optical fiber and are therefore of potential use in optical communications.
113. To date, microlasers operating IN THE LONGER-WAVELENGTH REGION have not worked very well, primarily because of a lack of suitable semiconductor materials that can be grown into a stack of layers forming mirrors for those wavelengths.

114. At present, instead of being five or six microns tall, AN EFFICIENT MICROLASER working at 1.5 microns would have to be about 20 microns tall, which would take almost 24 hours to grow precisely using molecular-beam epitaxy.
115. SUCH A STRUCTURE would not be very practical, but alternative designs still to be demonstrated may prove sufficient.

PÁRRAFO 26

116. Further miniaturization which is ALSO just now being explored, is THE SECOND LIKELY LINE OF FUTURE RESEARCH.
117. THE ROAD will be difficult;
118. we are already close to reaching THE SMALL-SIZE LIMIT beyond which the lasers will no longer work.
119. THE REASON is that the diameter of THE LASER must be comparable to the wavelength of the radiation it emits;
120. if THE DIAMETER is smaller than THE WAVELENGTH, it does not contain the light effectively.
121. ADMITTEDLY, there is an added bonus of working with gallium arsenide:
122. although THE LASER WAVELENGTH is about one micron in air, within the laser itself it is about three times shorter because of the high index of refraction of the semiconductor.

123. AT SOME SIZE SMALLER THAN 0.3 MICRON, HOWEVER, A MICROLASER will no longer work.

PÁRRAFO 27

124. Why bother to shrink THE SIZE OF MICROLASERS from a relatively comfortable one micron to, say, a difficult one third of a micron?

125. FURTHER REDUCTION could allow an order of magnitude more information to be communicated and processed with the same power requirements.

126. SECOND, EVEN MORE FUNDAMENTAL ADVANTAGES IN POWER AND SPEED could be attained -advantages that are not predicted by simple scaling.

PÁRRAFO 28

127. VIRTUALLY EVERY LASER is inefficient.

128. The first flash of light emitted by the pumped atoms IN THE AMPLIFYING MEDIUM goes randomly in all directions.

129. MOST OF THE LIGHT does not even strike the laser mirrors, and it is lost.

130. ONLY A TINY FRACTION, ONE PART IN 10,000 OR SO, travels in just the right direction to contribute to the working of the laser.

131. It turns out, HOWEVER, that when the cavity containing THE AMPLIFYING MEDIUM is short and has a small diameter, the walls of the cavity itself, through reflections, can modify the direction in which THE LIGHT is initially emitted.
132. IN A SMALL CAVITY THE LIGHT can be emitted only IN CERTAIN ALLOWED DIRECTIONS and at certain wavelengths.
133. IN AN EXTREMELY SMALL CAVITY THE LIGHT IS EMITTED ONLY ALONG THE DIRECTION of the desired laser beam.

PÁRRAFO 29

134. It would THEREFORE appear that MICROLASERS having a diameter of approximately one third of a micron may form the ultimate optoelectronic information-processing device: a small, fast and highly efficient laser requiring low power.
135. Although the prime motivation for building SUCH A DEVICE would be for information processing, other applications would undoubtedly be found.
136. Panels of VISIBLE-LIGHT MICROLASERS could provide efficient lighting, turning THE APPLICATIONS full circle from exotic optoelectronic computer technology to a more down-to-earth lamp with which you might read this magazine.

PÁRRAFO 30

137. We have experimented to see just how small MICROLASERS can be made and still work.

138. For the purposes of OUR TESTS, we pump the atoms IN THE AMPLIFYING MEDIUM with focused bursts of light instead of electric current.
139. It is easier to fabricate LIGHT-PUMPED DEVICES than electrically pumped ones, and although OPTICALLY PUMPED DEVICES are never expected to have any commercial potential, OUR TESTS with them have helped convince us (and our managers) that an effort to make electrically pumped cavities of such size is not completely outrageous.

PÁRRAFO 31

140. So far WE have demonstrated that DEVICES HAVING A DIAMETER AS SMALL AS ONE HALF OF A MICRON can work.
141. Interestingly enough, OUR TESTS actually precede any accurate theoretical simulation.
142. MODELING THE COMPLEX INTERACTIONS ARISING FROM THE LARGE NUMBER OF SEMICONDUCTOR LAYERS would consume huge amounts of computer time and might even require an optical computer!

PÁRRAFO 32

143. Perhaps the most exciting aspect of MICROLASER RESEARCH is the manner in which it spans the disciplines of fundamental physics, device physics, classical optics, semiconductor optics and optoelectronics and systems integration.
144. MICROLASERS ALSO challenge investigators' creativity to take advantage of the tremendous applications awaiting discovery.

145. Communications and remote sensing are two areas in which OPTICAL SYSTEMS appear to have fundamental advantages over electronic systems.
146. As machine vision becomes increasingly important, ARRAYS OF INEXPENSIVE MICROLASERS could allow the technology to be adapted to aid the sight-impaired.
147. We believe the variety of applications of MICROLASERS will be exceedingly wide, but at this point it is only a belief.
148. WE look forward to re-reading our article 10 years from now to see where we were completely off target and where we were right on.

ANEXO 6
SINGLE ELECTRONICS

0.1. Is electric current the motion of INDIVIDUAL ELECTRONS or the continuous flow of A FLUID OF CHARGE?

0.2. Recent experiments confirm BOTH IDEAS and may lead to novel electronic devices

PÁRRAFO 1

1. What is the smallest amount of ELECTRIC CHARGE that can sit on the head of a pin?
2. THE ANSWER may surprise.
3. A PIN, like almost everything else, consists of electrons, protons and neutrons.
4. EACH PROTON holds one fundamental unit of charge (denoted as $+e$), and EACH ELECTRON carries a similar negative charge ($-e$);
5. THE NEUTRON has no CHARGE.
6. It may seem that THE TOTAL CHARGE ON THE HEAD OF THE PIN could be found by counting the number of protons, subtracting the number of electrons and ignoring the neutrons.
7. Using THIS LOGIC, the smallest nonvanishing amount of charge should be $+e$ or $-e$.

8. BUT recent experiments demonstrate OTHERWISE.
9. THEY clearly show that the charge on the head of a pin can be equal to a fraction of the charge of an electron, for example, $+0.5e$ or $-0.1e$.

PÁRRAFO 2

10. Whereas counting the number of angles ON A PIN has yet to yield anything of practical value, measuring CHARGE in small structures has provided fascinating tests of physics as well as several potential applications for electronics.
11. THE TESTS were performed with extremely small devices, typically about 30 billionths of a meter in width, which is comparable to the diameter of a virus.
12. By studying the behavior of SUCH MINUSCULE COMPONENTS at temperatures of a fraction of a degree above absolute zero, researchers have developed a better understanding of how electric charges move through materials.
13. Whereas A CHARGE passes through thin insulators in discrete amounts (like water dripping from a faucet), IT travels through ordinary conducting materials in a continuous way (like water flowing in a pipe).

PÁRRAFO 3

14. THESE DISCOVERIES have led to the invention of various novel devices that control the movement of individual electrons in solids.
15. THE SINGLE-ELECTRON IC DEVICES may serve as transistors and other computational elements.

16. Although THE TECHNOLOGY is still in its infancy, we believe IT will play a major role in the future of electronics.

PÁRRAFO 4

17. THE FIELD OF SINGLE ELECTRONICS emerged from investigations of a device known as a tunnel junction.
18. IT consists of two electrodes - pieces of a conducting material - separated by a thin layer of an insulating material, as thin as about one nanometer (a billionth of a meter).
19. Although electrons move freely in CONDUCTORS, they do not readily enter INSULATORS.
20. YET according to the laws of quantum mechanics, ELECTRONS have small chance to pass, or tunnel, through the thin insulating layer.

PÁRRAFO 5

21. If a voltage is applied across the junction, ELECTRONS will prefer to tunnel in one particular direction through the insulator.
22. HENCE, THEY will carry some electric current through the junction.
23. The magnitude of THE CURRENT depends on both the thickness of the insulating layer and the material properties of the conducting electrodes.

PÁRRAFO 6

24. By the middle of the 1980s physicists understood many properties of TUNNEL JUNCTIONS.
25. A FEW PHYCISTS suspected, HOWEVER, that TUNNEL JUNCTIONS would exhibit interesting behavior if they were made smaller than 100 nanometers or so.

PÁRRAFO 7

26. In early 1985 DIMITRI AVERIN AND ONE OF US (LIKHAREV) tried to predict the behavior of VERY SMALL TUNNEL JUNCTIONS with superconducting electrodes.
27. (SUPERCONDUCTIVITY is a property of some materials cooled to temperatures close to absolute zero.
28. Notably, SUPERCONDUCTORS do not resist the flow of electric current.)
29. Averin and Likharew hoped to tackle THE PROBLEM by applying ideas of quantum theory.
30. THEY derived some equations that described the device, but the equations were so complicated that they could not have been solved without a struggle.

PÁRRAFO 8

31. It was decided, THEREFORE, to examine THE EASIER CASE of a small tunnel junction with electrodes made from ordinary conductors.

32. FOR THIS PROBLEM, the equations could be readily solved and gave a completely unexpected result.
33. THEY showed that if a constant electric current is passed through a junction, it will induce a voltage that oscillates periodically in time.
34. Most remarkably, THESE PERIODIC OSCILLATIONS would have a frequency simply equal to the current divided by the charge of an electron.
35. THE FREQUENCY is totally independent of any other parameters of the system.
36. A MORE CAREFUL EXAMINATION OF THE EQUATIONS has shown that EACH OSCILLATION represents the response of the device as a single electron tunnels through the insulating layer.
37. THE PHENOMENON is now known as single-electron tunneling (set) oscillations.

PÁRRAFO 9

38. To understand THIS EFFECT, one must appreciate how electric charge moves through a conductor, say, an ordinary aluminum wire.
39. An electric current can flow through THE CONDUCTOR because some electrons are free to move through the lattice of atomic nuclei.
40. Despite THE MOTION OF THE ELECTRONS, any given volume of THE CONDUCTOR has virtually no net charge because the negative charge of the moving electrons is always balanced by the positive charge of the atomic nuclei in each small fraction of the conductor.

41. HENCE, the important quantity is not THE CHARGE IN ANY GIVEN VOLUME but rather how much charge has been carried through the wire.
42. THIS QUANTITY is designated as the «transferred» charge.
43. What is most surprising, THIS CHARGE can have practically any value, even a fraction of the charge of a single electron.

PÁRRAFO 10

44. Although THIS CONCEPT may seem counterintuitive at first, IT can be explained in simple terms.
45. THE TRANSFERRED CHARGE actually has little to do with counting single electrons or protons.
46. THIS CHARGE is proportional to the sum of shifts of all the electrons with respect to the lattice of atoms.
47. Because THE ELECTRONS in a conductor can be shifted as little or as much as desired, THIS SUM can be changed continuously, and therefore so can THE TRANSFERRED CHARGE.

PÁRRAFO 11

48. If AN ORDINARY CONDUCTOR is interrupted by a tunnel junction, ELECTRIC CHARGE will move through the system by both a continuous and a discrete process.

49. As THE TRANSFERRED CHARGE flows continuously through the conductor, IT will accumulate on the surface of the electrode against the insulating layer of the junction
50. (THE ADJACENT ELECTRODE will have equal but opposite surface charge).
51. One can imagine THIS SURFACE CHARGE Q as a slight continuous shift of the electrons near the surface from their equilibrium positions.
52. ON THE OTHER HAND, quantum mechanics shows that the tunneling can only change Q in a discrete way:
53. when an electron TUNNELS through the insulating layer, THE SURFACE CHARGE Q will change exactly by either +e or -e, depending on the direction of tunneling.
54. The interplay between continuous charge flow in conductors and DISCRETE TRANSFER OF CHARGE THROUGH TUNNEL JUNCTIONS leads to several interesting effects.

PÁRRAFO 12

55. THESE PHENOMENA can be observed when THE TUNNEL JUNCTIONS are very small and the ambient temperatures are very low.
56. (LOW TEMPERATURES reduce thermal fluctuations that disturb the motion of electrons.)
57. IN THIS CASE, if the charge Q at the junction is greater than +e/2, an electron can tunnel through the junction in a particular direction, subtracting e from Q.

58. THE ELECTRON DOES SO because THIS PROCESS reduces the electrostatic energy of the system
59. (THE ENERGY increases in proportion to the square of the charge and does not depend on the sign of the charge.)
60. LIKEWISE, if Q is less than $-e$, an electron can tunnel through the junction in the opposite direction, adding e to Q , and thus again decrease THE ENERGY.
61. BUT IF Q IS LESS THAN $+E/2$ and greater than $-e/2$, tunneling in any direction would increase THE ENERGY of the system.
62. THUS, if the initial charge is within THIS RANGE, TUNNELING will not occur.
63. THIS SUPPRESSION OF TUNNELING is known today as the Coulomb blockade.

PÁRRAFO 13

64. Curiously, physicists first noticed and studied COULOMB BLOCKADE more than 40 years ago.
65. In the 1950s and 1960s CORNELLIS GORTER OF THE KAMMERLING ONNES LABORATORY, HANS-RUDI ZELLER AND IVAR GIAVER OF THE GENERAL ELECTRIC RESEARCH CENTER AND JOHN LAMBE AND ROBERT JAKLEVICH OF THE FORD MOTOR COMPANY observed THIS EFFECT in thin metallic films and explained IT.
66. MEANWHILE IGOR KULIK AND ROBERT SHEKHTER OF THE KHARKOW INSTITUTE OF LOW TEMPERATURE PHYSICS devised ITS comprehensive theory for one particular system.

67. It seems, HOWEVER, that until the mid-1980s no one appreciated the concept of continuous charge transfer in metals, and no one was aware of the simple condition for THE COULOMB BLOCKADE.
68. Once THESE IDEAS were understood, it was straightforward to discover new phenomena in small tunnel junctions.

PÁRRAFO 14

69. FOR EXAMPLE, what happens if THE JUNCTION is connected to a source of constant current?
70. If the surface charge Q is zero initially, then THE SYSTEM is within the Coulomb blockade limits, and TUNNELING is suppressed.
71. THEREFORE, the current flowing from the source through wires will start to change THE CHARGE Q continuously.
72. For convenience, assume that THE DEPOSITED CHARGE RATE is positive rather than negative.
73. If THE CHARGE reaches and slightly exceeds $+e/2$, tunneling becomes possible.
74. One electron will THEN cross the junction, making ITS CHARGE SLIGHTLY GREATER THAN $-E/2$.
75. HENCE, THE SYSTEM is within the Coulomb blockade range again, and tunneling is not possible.

76. The current continues to add positive charge to THE JUNCTION at a constant rate, and Q , grows until it exceeds $+e/2$ again.
77. The repetition of THIS PROCESS produces the single-electron tunneling (SET) oscillations:
78. THE VOLTAGE changes periodically with a frequency equal to THE CURRENT divided by the fundamental unit of charge, e .

PÁRRAFO 15

79. IN THIS RESPECT, CHARGE flows through the tunnel junction like water leaking from a faucet.
80. INITIALLY, THE CHARGE collects in the junction just as water forms a droplet on the faucet.
81. AND INDEED, when ENOUGH CHARGE builds up, SOME OF IT pushes through the junction just as when THE DROPLET reaches a certain size, IT will fall.
82. YET whereas THE WATER DROPLETS can vary in size, THE AMOUNT OF TUNNELING CHARGE is quantized;
83. IT always equals e .

PÁRRAFO 16

84. With a couple of plausible assumptions, the formula for the frequency of SET OSCILLATIONS can be derived from classical physics, because it describes behavior of electrons as particles.

85. NEVERTHELESS, a deep connection exists between SET OSCILLATIONS and one type of oscillations predicted by quantum theory.
86. In many situations, THE ELECTRON behaves like a wave rather than a particle.
87. THE ELECTRON WAVE has a characteristic frequency, which is equal to the energy of the electron divided by Planck's constant.
88. In 1962 Brian Josephson (then a student at the University of Cambridge) showed that in large tunnel junctions with superconducting electrodes, THIS RELATION can be observed experimentally as a fundamental relation between applied voltage and the frequency of oscillations in the current flowing through the junction.
89. In the mid-1980s James Lukens and his co-workers at the State University of New York at Stony Brook used THESE «JOSEPHSON JUNCTIONS» to demonstrate that the Planck-Bohr-Josephson relation is accurate to at least 16 decimal places.
90. We believe the classical equation for SET oscillations will prove to be EQUALLY EXACT.

PÁRRAFO 17

91. To produce SET OSCILLATIONS, physicists must fabricate tunnel junctions of a very small area and cool them enough to ensure that the thermal energy does not influence tunneling.
92. FOR EXAMPLE, THE DEVICE MUST BE COOLED to temperatures of about a tenth of a degree above absolute zero if the junction is 100 nanometers in length and width.

PÁRRAFO 18

93. LOW-TEMPERATURE REFRIGERATION AND SMALL-SCALE FABRICATION are not the only experimental problems that must be overcome.
94. To apply current and voltage to A TUNNEL JUNCTION, one must attach metallic wires to it.
95. Unfortunately, THE WIRES pick up quantum fluctuations of the electromagnetic fields that exist everywhere.
96. THESE FLUCTUATIONS can jam the single-electron effects completely.
97. One of the simplest ways to eliminate THE JAMMING is to connect several tunnel junctions in series (end to end).
98. IN SUCH AN ARRANGEMENT the junctions defend one another from the fluctuations.
99. THIS IDEA was implemented in 1989 by a team of Swedish and Soviet scientists.
100. THE TEAM - which included Per Delsing of Chalmers University of Technology in Sweden, Leonid Kuzmin of Moscow State University and the authors - made the junctions by modifying the so-called suspended mask technique for nanofabrication.
101. Several investigators contributed to the invention of THE TECHNIQUE, which was perfected by Gerald Dolan of AT&T Bell Laboratories.

PÁRRAFO 19

102. TO START, AN INSULATING SUBSTRATE should be coated with two layers of special organic materials, both thinner than one micron.
103. We used a copolymer of polymethymethacrylate (PMMA) and polymethacrylic acid (PMAA) for THE BOTTOM LAYER, whereas THE TOP LAYER was pure PMMA.
104. THE COATED SUBSTRATE is THEN placed into the vacuum chamber of a scanning electron microscope.
105. Although THE INSTRUMENT is mainly designed for imaging applications, IT is useful for device fabrication because IT produces a beam of electrons a few nanometers in diameter, and THE BEAM has enough energy to break polymer bonds.
106. A computer directs THE BEAM to sweep over the polymer coating in a desired pattern.
107. In our experiments THE PATTERN was a chain of closely located rectangular windows, 200 by 80 nanometers.
108. THE SAMPLE is THEN developed in toluene, which removes PMMA from the exposed regions and the underlying copolymer from a somewhat larger area.
109. THIS PROCESS leaves a PMMA layer with open windows that is suspended above the substrate.

PÁRRAFO 20

110. AT THIS STAGE, THE SAMPLE is placed into another vacuum chamber and is subjected to a beam of aluminum atoms.
111. THIS BEAM deposits a thin aluminum film on the PMMA layer and on the parts of the substrate under the open windows.
112. (THESE ALUMINUM ISLANDS will ultimately become the first conducting layer of the tunnel junction array.)
113. THEN a small amount of dry oxygen is allowed into the chamber, forming a very thin layer of aluminum oxide on THE SURFACE.
114. (THE ALUMINUM OXIDE will become the insulating layer of the junction.)
115. THE OXIGEN is pumped out again, and A SECOND LAYER OF ALUMINUM is deposited from another angle.
116. IN THIS WAY, the islands of THE FIRST AND THE SECOND LAYER overlap, forming an array of tunnel junctions, each close to 80 by 60 nanometers.

PÁRRAFO 21

117. As our team began fabricating ARRAYS OF TUNNEL JUNCTIONS, we also considered how we might best measure SET oscillations.
118. The expected power of THE OSCILLATIONS would be very low.

119. To make DIRECT MEASUREMENTS, we would need extremely sensitive high-frequency detectors.
120. A SIMPLER WAY TO DETECT THE OSCILLATIONS is to irradiate the sample with microwaves.
121. THE RADIATION interacts («mixes») with the SET oscillations in a way that can be easily observed.
122. SPECIFICALLY, as the current through THE JUNCTIONS increases from zero, the voltage should increase until the current equals e times the frequency of the microwave radiation.
123. As THE VOLTAGE continues to increase, THE CURRENT remains constant for a while and then increases
124. AS A RESULT, A PLOT OF CURRENT VERSUS VOLTAGE should show horizontal steps at a current equal to the frequency times $+e$ (or $-e$).
125. In July 1989 we observed THE EXPECTED STEPS.

PÁRRAFO 22

126. OUR RESULTS were soon confirmed by a Dutch-French collaboration of researchers working at Delft University of Technology and the Center of Nuclear Research at Saclay.
127. THESE GROUPS used two different types of junction arrays, in which the microwave field is applied to central electrodes rather than at the edges of the array.

128. WITH THESE DEVICES, the current to frequency relation was tested with an accuracy close to 0.1 percent.
129. MOREOVER, in 1990 Bart Geerling and Hans Mooij of the Delft group confirmed a theory by Averin and Arcadii Odintsov, which shows how THE ACCURACY might be improved.
130. We believe that in the near future THE CURRENT TO FREQUENCY RATIO will be measured with an error below at least one part per million - and probably much better.

PÁRRAFO 23

131. PHENOMENA SIMILAR TO SINGLE-ELECTRON OSCILLATIONS should ALSO occur in tunnel junctions that have superconducting electrodes.
132. In 1982 Allen Widom, Terry Clark and their collaborators at the University of Brighton first suggested a rudimentary theory for SUCH PHENOMENA IN SUPERCONDUCTING TUNNEL JUNCTIONS.
133. THEN, in 1984, Alexander Zorin of Moscow State University and one of us (Likharev) developed A MORE REFINED AND REALISTIC THEORY.

PÁRRAFO 24

134. IN SUPERCONDUCTORS, each electron has a partner, forming what is known as a Cooper pair.

135. CONSEQUENTLY, if a tunnel junction is made from two superconducting electrodes, THE ELECTRONS tend to tunnel through the insulator in pairs.
136. Theory predicts, THEREFORE, that the voltage of A VERY SMALL SUPERCONDUCTING TUNNEL JUNCTION will oscillate in time with a frequency equal to the current divided by $2e$ (rather than e).
137. Likharev and Zorin called THIS PARTICULAR EFFECT Bloch oscillations.
138. In February 1991 Kuzmin, David Haviland and their colleagues at Chalmers found reliable evidence for BLOCH OSCILLATIONS in a small junction formed between two thin films made of a superconducting alloy.

PÁRRAFO 25

139. THE SET AND BLOCH OSCILLATIONS can be considered as the ordering («correlation») of single-electron or Cooper-pair tunneling events in time.
140. ANOTHER TYPE OF CORRELATION OF THESE EVENTS is ALSO possible and is important for future applications.
141. THIS TYPE OF CORRELATION occurs, FOR EXAMPLE, in a device consisting of two tunnel junctions that share a middle electrode.
142. If a constant voltage is applied across THE DEVICE, the tunneling events in each of the junctions should be mutually correlated.
143. SPECIFICALLY, whenever AN ELECTRON TUNNELS THROUGH ONE OF THE JUNCTIONS, a second electron passes through the other junction nearly simultaneously.

PÁRRAFO 26

144. MOST IMPORTANT, as Averin and Likharev showed in 1985, THIS CORRELATED TUNNELING can be controlled if electric charge is continuously injected into (or removed from) the electrode that connects the two junctions.
145. If THE CHARGE INJECTED INTO THE ELECTRODE is close to zero or a multiple of e , the device maintains a considerable Coulomb blockade:
146. no current flows through THE JUNCTION if the voltage applied to the system is lower than a particular threshold.
147. BUT if THE CHARGE OF THE MIDDLE ELECTRODE is either $+0.5e$ or $-0.5e$ (or even $+ 1.5e$, $+ 2.5e$ and so on), the Coulomb blockade is completely suppressed:
148. ELECTRONS tunnel through the system, and a current can be induced by even a small applied voltage.
149. THUS, THE CURRENT THROUGH THE DEVICE can be controlled by changing the charge of the middle electrode just as the current through a usual semiconductor transistor, but THIS CONTROL can be achieved by much weaker charge signals.
150. FOR THIS REASON, THE TWO TUNNEL-JUNCTION DEVICE is now known as the single-electron transistor.

PÁRRAFO 27

151. Fortunately, THE CORRELATED TUNNELING EFFECT is not sensitive to quantum fluctuations of the ambient electromagnetic field, and so THE DEVICE can be connected easily to a voltage source and measuring instruments.
152. FOR THIS REASON, Kuzmin and Likharew were able to conduct experiments on THE SINGLE-ELECTRON TRANSISTOR very rapidly after the device was conceived.
153. On March 6, 1987, THEY reported their results to a Soviet journal.
154. (THEY later learned that, on the same day, Theodore Fulton and Gerald Dolan of Bell Labs had submitted a paper on ALMOST SIMILAR OBSERVATIONS to an American journal.)
155. THESE TWO WORKS marked the beginning of experimental single electronics.

PÁRRAFO 28

156. During the past five years, physicists have devised MANY TYPES OF SINGLE-ELECTRON TRANSISTORS and developed MORE COMPLEX SINGLE-ELECTRONIC CIRCUITS.
157. THE BEHAVIOR OF ALL THESE CIRCUITS can be fully explained using what is now called the orthodox theory, which the Moscow group formulated in 1985.
158. HENCE, THE ORTHODOX THEORY can be used to analyze possible applications of single electronics.

PÁRRAFO 29

159. In the near future, we foresee at least THREE IMPORTANT APPLICATIONS.

160. FIRST, THE TECHNOLOGY should provide a new standard for measuring small currents.

161. We expect AN ACCURACY OF BETTER THAN ONE PART PER BILLION, about 1,000 times better than existing systems.

162. SECOND, THE TECHNOLOGY promises supersensitive electrometers - instruments that would measure charges as small as one tenthousandth of e, which is almost a million times better than the resolution of commercially available instruments.

163. (SUCH ELECTROMETERS have already been used by researchers at Saclay and at Bell Labs to measure single-electron tunneling effects in other devices.)

PÁRRAFO 30

164. BUT THE MOST IMPORTANT PROSPECT FOR SINGLE ELECTRONICS is its application to digital integrated circuits.

165. Currently COMPUTER CHIPS can have a density of some 10 million devices per square centimeter.

166. Although THIS ACHIEVEMENT is impressive, COMPUTER DESIGNERS continue to demand chips with ever higher device densities.

167. BUT THE CONVENTIONAL ELECTRONIC DEVICES are approaching their limit.

168. Most agree that ANY FURTHER REDUCTIONS IN SIZE will require radically new ideas, and single electronics in ranked highly on THIS ISSUE.

PÁRRAFO 31

169. IN CIRCUITS BASED ON SINGLE ELECTRONICS, bits of information can be represented as the presence or absence of individual electrons.

170. THIS TECHNOLOGY may make it possible to pack up to 10 billion electronic devices on a one-square-centimeter chip

171. (FOR THAT, the dimensions of tunnel junctions could be reduced to about 10 nanometers).

172. SUCH A CIRCUIT would operate at four kelvins, a temperature that is acceptable for some applications.

173. STILL, THE DEVELOPMENT OF SUCH CIRCUITS will require a considerable investment of time and effort.

PÁRRAFO 32

174. Conceivably, SINGLE-ELECTRON CIRCUITS could be made even more dense, but SUCH ATTEMPTS will encounter two problems.

175. FIRST, RESEARCHERS need to pioneer techniques to fabricate complex structures whose smallest dimension is less than 10 nanometers.

176. SECOND, THEY must determine how single-electron effects change as the dimensions of the device decrease to the atomic scale.

PÁRRAFO 33

177. To solve THIS SECOND PROBLEM, Averin and Alexander Korotkow State University revised the Orthodox theory in 1989.

178. THEY recognized that if a device is small enough, the laws of quantum mechanics play a larger role in the system.

179. IN SUCH CASES, the energies of the electrons are quantized, that is, they can only equal certain discrete values.

180. YET they showed that THE ENERGY QUANTIZATION does not exclude correlated tunneling, and indeed the effects can coexist peacefully.

PÁRRAFO 34

181. To verify THIS CONCLUSION, several groups have performed experiments in which electrons are confined within tiny structures made of semiconducting material.

182. SUCH STRUCTURES, which are known as quantum dots and quantum wells, can hold a «puddle» of a few hundred free electrons.

183. BOTH DEVICES allow electrons to tunnel in or out through well-defined energy barriers.

184. IN BOTH TYPES OF EXPERIMENTS, physicists have observed single-electron effects and energy quantization together, confirming that the phenomena can coexist.
185. Paul Mc Euen and his colleagues at the Massachusetts Institute of Technology and the IBM Thomas J.Watson Research Center were the first to demonstrate THIS COEXISTENCE in quantum dots;
186. Bo Su and his co-workers at Stony Brook and at Bell Labs have obtained SIMILAR RESULTS using quantum wells.

PÁRRAFO 35

187. Several fundamental issues are still to be solved.
188. FOR ONE, investigators have not yet tackled THE ISSUE OF HOW ENERGY QUANTIZATION INFLUENCES SINGLE-ELECTRON CHARGING EFFECTS IN CIRCUITS THAT CONSIST OF MANY QUANTUM DOTS OR QUANTUM WELLS.
189. A PRELIMINARY ANALYSIS shows that IN SUCH STRUCTURES an electron can behave simultaneously as a wave and as a particle.
190. If THIS PREDICTION turns out to be true, IT will be very important for fundamental physics.

PÁRRAFO 36

191. ANOTHER UNRESOLVED ISSUE is whether the correlated transfer of electrons requires tunneling.

192. Averin and Likharev have recently given arguments that IT does not.
193. SUCH CORRELATED FLOWS may be achieved in narrow channels, where the electrons can propagate only in one direction.
194. Forthcoming experiments should reveal whether SUCH CHANNELS can be fabricated.

PÁRRAFO 37

195. REGARDLESS OF THESE NEW ISSUES, single electronics has already advanced our understanding of how electrons behave in materials.
196. We believe that A CONTRIBUTION has been made as well to what could be called the psychology of physics.
197. THE DISCOVERY OF CORRELATED TUNNELING has given us an example of a conceptually simple and fundamental effect that remained undiscovered until the mid-1980s.
198. IT has shown that Newton's «ocean of undiscovered truth» is still full and is waiting for scientists armed with not much more than a bit of imagination and creativity.
199. THIS is something to be remembered by adherents of theoretical supersophistication and advocates of multibillion-dollar experiments.

ANEXO 7

LA FÍSICA DE SUPERFICIES

0. Los avances recientes de LA FÍSICA DE SUPERFICIES están produciendo una avalancha de conocimientos, básicos y aplicados, sobre el comportamiento atómico en el universo en dos dimensiones de las superficies sólidas

PÁRRAFO 1

1. El ser humano se ha sentido siempre fascinado por LA SUPERFICIE de las cosas.
2. Es fácil rastrear en los antiguos testimonios de primitivos científicos, como los adivinos sumerios o los alquimistas medievales, su preocupación por entender el papel de LAS SUPERFICIES en el comportamiento cotidiano de LAS COSAS.
3. En el Museo Británico de Londres se guarda lo que probablemente constituye la prueba escrita más antigua de ESTA ATÁVICA CURIOSIDAD: una tablilla de la época de Hammurabi, en la que se encuentra, grabada en escritura cuneiforme, una descripción detallada de las formas cambiantes de la interfase entre aceite y agua que los adivinos sumerios utilizaban para predecir el curso futuro de campañas guerreras u operaciones comerciales.

PÁRRAFO 2

4. Las aplicaciones prácticas de ESTE CONOCIMIENTO EMPÍRICO son, ASIMISMO, antiguas.
5. Ya Plinio describió, con todo pormenor, cómo calmar las olas del mar arrojando pequeñas cantidades de aceite sobre superficie.

6. LOS PRIMEROS ENSAYOS SISTEMÁTICOS que señalaban la importancia de LOS TRATAMIENTOS SUPERFICIALES estaban relacionados con la orfebrería, como LA RELATADA en el manuscrito De proprietatibus rerum, redactado aproximadamente en 1252:
7. «Si se desea unir rígidamente UNA PLACA DE ORO CON OTRA DE PLATA, antes de golpearlas con el martillo, debe uno precaverse contra el viento, el polvo y la humedad, porque si alguna de estas tres cosas se introdujera entre el oro y la plata, no se podrá juntarlas».

PÁRRAFO 3

8. En el curso del enorme avance científico que tuvo lugar en el siglo pasado se pusieron las bases para dos de las aplicaciones más importantes, todavía hoy, de LA CIENCIA DE SUPERFICIES.
9. En 1833, Michael Faraday realizó unos cuidadosos experimentos que le permitieron adelantar una explicación del MISTERIOSO EFECTO QUE PRODUCÍA EL PLATINO SOBRE LA REACCIÓN ENTRE EL HIDRÓGENO Y EL OXÍGENO, induciéndola a temperaturas muy inferiores a la de combustión.
10. FARADAY sentó ASÍ los fundamentos de nuestra comprensión actual de LA ACCIÓN CATALÍTICA DE LA SUPERFICIES SÓLIDAS.
11. En 1873, Karl Ferdinand Braun observó, por su parte, que LA UNIÓN ENTRE UNA PUNTA AFILADA METÁLICA Y CRISTALES DE SEMICONDUCTORES COMPUESTOS (EL SULFURO DE HIERRO O PLOMO) presentaba propiedades rectificadoras, esto es, que la corriente eléctrica circulaba mejor en una dirección que en la opuesta.

12. EL JOVEN BRAUN (tenía 24 años en ese momento) atribuyó ESE COMPORTAMIENTO a la existencia de una capa delgada en la interfase entre AMBOS MATERIALES.
13. ESTE DESCUBRIMIENTO es la base de los diodos y transistores presentes en toda la electrónica moderna.
14. BRAUN recibió el premio Nobel de física en 1909, junto con Marconi, por el desarrollo de los rectificadores de estado sólido que condujo a la telegrafía sin hilos.

PÁRRAFO 4

15. Ya en nuestro siglo se produjeron dos avances importantísimos en el desarrollo de LA FÍSICA DE SUPERFICIES.
16. PHILIP LENARD PUSO A PUNTO TÉCNICAS ESPECTROSCÓPICAS QUE APROVECHABAN EL EFECTO FOTOELÉCTRICO (descubierto por Hertz en 1887 y cuya explicación le valió a Einstein el premio Nobel en 1921) Y CLINTON DAVISSON DESCUBRIÓ LA DIFRACCIÓN DE ELECTRONES (POR LO QUE FUE GALARDONADO CON EL NOBEL EN 1937).
17. AMBOS FENÓMENOS están relacionados con notables propiedades de la superficie, como ya sus respectivos descubridores observaron.
18. DE HECHO, hoy en día, CONSTITUYEN el fundamento de dos técnicas habituales para determinar la estructura electrónica y geométrica, respectivamente, de las superficies - la espectroscopía de fotoelectrones y la difracción de electrones de baja energía

19. [véase «Estructuras atómicas de superficies sólidas», por P.M. Echenique y M.H. van Hove; INVESTIGACION Y CIENCIA, ABRIL DE 1979].

PÁRRAFO 5

20. SIN EMBARGO, es Irving Langmuir, ilustre físico estadounidense que recibió el premio Nobel en 1932, el que es considerado padre de LA FÍSICA DE SUPERFICIES MODERNA.
21. EN EFECTO, en las décadas de las dos guerras mundiales, LANGMUIR realizó una ingente labor creando los métodos experimentales de alto vacío, los cuales le permitieron abordar problemas básicos, como la reducción en la función de trabajo producida por la absorción de metales alcalinos sobre superficies metálicas, la emisión termoiónica o los mecanismos de quimisorción.
22. SUS amplios intereses científicos LE llevaron a brillantes aplicaciones de sus descubrimientos, como las lámparas incandescentes de atmósfera inerte, básicamente idénticas a las que se emplean hoy en día.
23. SUYA es la principal responsabilidad de haber elevado la física de superficies a la categoría de disciplina con entidad propia.

PÁRRAFO 6

24. Si ÉSTE fue el nacimiento de LA ESPECIALIDAD, el acontecimiento decisivo que desencadenó un enorme interés por la física fundamental de las superficies de semiconductores recayó en el descubrimiento del transistor de contacto puntual por Bardeen y Brattain, seguido por el transistor de unión p-n por Shockley en diciembre de 1947.

25. En la postguerra, atraídos por la indudable importancia de las aplicaciones prácticas, los físicos teóricos del estado sólido trataron de comprender las propiedades de LAS SUPERFICIES DE LOS SÓLIDOS.
26. ASÍ, mientras NEVILL MOTT (premio Nobel en 1977) sugería una explicación de los fenómenos en la unión metal-semiconductor, NICOLÁS CABRERA, entonces en la Universidad de Bristol, con la ayuda de su colaborador W.K. Burton elaboró en 1949 una teoría refinada del crecimiento cristalino, todavía utilizada.
27. PERO fue, sin duda, el desarrollo técnico derivado de la carrera espacial lo que permitió en la década de los sesenta la existencia de campanas de vacío comerciales, en las que, por primera vez, era posible limpiar LA SUPERFICIE y mantenerla en condiciones controladas.
28. En 1969 Harris introdujo la espectroscopía de electrones Auger, que permite determinar la composición química de UNA SUPERFICIE con una sensibilidad del orden del 1 por ciento de una capa atómica.

PÁRRAFO 7

29. Desde la década de los setenta, LA FÍSICA DE SUPERFICIES ha emergido como un ejemplo emblemático de revolución científica según el conocido arquetipo de Thomas Kuhn, historiador de la ciencia.
30. El cambio en nuestra visión del mundo que comporta TODA REVOLUCIÓN CIENTÍFICA es, EN ESTE CASO, la aparición de la región material de la interfase entre dos medios como una entidad autónoma.
31. UN ESTADO DE LA MATERIA con sus propias leyes, composición química, estructura geométrica, estados electrónicos y dinámica atómica.

32. ESTE CAMBIO CONCEPTUAL ha ido acompañado en la década de los ochenta por un altísimo refinamiento de las técnicas experimentales y un número creciente de investigadores dedicados a ella, por la realización de cuantiosas inversiones y por la proliferación de especialidades científicas (física de la materia condensada, ciencia de materiales, microelectrónica, optoelectrónica, catálisis, químico-física, electroquímica, etcétera) que se han visto enriquecidas por los desarrollos recientes de la física de superficies.

PÁRRAFO 8

33. PERO, ¿qué es UNA SUPERFICIE?

34. Entre dos medios, cualesquiera (sólidos-gas, sólido-líquido, sólido-sólido, etc) siempre existe UNA ZONA SUPERFICIAL O INTERFACIAL que los separa.

35. ESTA REGIÓN tiene propiedades mecánicas, de composición o electrónicas distinguibles de los medios que la flanquean.

36. El espesor de LA ZONA que debemos considerar superficie o interfase depende del tipo de propiedades a que nos estemos refiriendo.

37. A veces PUEDE SER estrictamente una sola capa atómica, mientras que en otras ocasiones puede extenderse decenas o incluso cientos de capas.

38. Si nos ceñimos a LA INTERFASE SÓLIDO-VACÍO, de la que poseemos mayor información en la actualidad, es sabido que tanto la disposición geométrica de los átomos de la superficie del sólido como los estados electrónicos pueden diferir notablemente de los del volumen.

39. LA REGIÓN DE LA SUPERFICIE puede tener una composición química distinta de la del interior del sólido.

40. LA SUPERFICIE EXPUESTA A LA ATMOSFÉRA, POR EJEMPLO, está cubierta por capas de contaminación debido a las reacciones con los gases y vapores de ésta.
41. Normalmente SE FORMAN óxidos y a menudo sulfuros, carbonatos u otros compuestos, según sean EL SUBSTRATO Y EL AMBIENTE.
42. ADEMÁS, LA SUPERFICIE puede presentar trazas de materiales que han estado en contacto previo con ella.
43. ASÍ, UNA SUPERFICIE ORDINARIA, aunque esté limpia a simple vista, es, en realidad, un complejo sistema de componentes químicos y restos de impurezas.
44. POR ELLO, se acostumbra a distinguir LAS SUPERFICIES «REALES» DE LAS «IDEALES», atómicamente limpias, en el sentido de no tener material extraño adherido a ellas.

PÁRRAFO 9

45. La naturaleza de LAS SUPERFICIES REALES reviste un enorme interés práctico.
46. La mayoría de las aplicaciones en que están comprometidas las superficies (lubricación, corrosión o rozamiento) requieren una comprensión de las propiedades de LAS SUPERFICIES REALES.
47. CON ESTE FIN se han desarrollado múltiples métodos no destructivos de análisis químico que permiten obtener la composición atómica de LA SUPERFICIE de un material sólido con alta resolución lateral [véase la figura 4].

PÁRRAFO 10

48. SIN EMBARGO, la explosión de actividad en la física de superficies registrada desde los años setenta ha tenido como objetivo fundamental el estudio de SUPERFICIES MONOCRISTALINAS Y ATÓMICAMENTE LÍMPIAS.
49. ¿Por qué se estudian ESTAS SUPERFICIES CASI IDEALES?
50. ¿Por qué se ha desarrollado PARA ELLO un amplio abanico de técnicas experimentales de refinada complejidad?
51. En primer lugar, porque nuestra capacidad para preparar SUPERFICIES ALTAMENTE PERFECTAS ha abierto la posibilidad de explorar un universo en dos dimensiones.
52. ESTO es algo fascinante.
53. Según se cree hoy, LA DIMENSIONALIDAD desempeña un papel clave en la teoría moderna de muchos fenómenos colectivos.
54. POR EJEMPLO, en una transición de fase continua el comportamiento crítico depende sólo de la simetría del sistema, LA DIMENSIONALIDAD del parámetro de orden y LA DIMENSIONALIDAD del espacio.
55. ESTA PROPIEDAD se llama universalidad y sugiere que pueden suceder cosas interesantes en la superficie donde la dimensionalidad efectiva es dos, no tres.
56. DE HECHO, gracias al método del grupo de renormalización [véase «Problemas físicos con muchas escalas de longitud», por Kenneth Wilson; INVESTIGACION Y CIENCIA, octubre de 1979], es posible calcular con exactitud los exponentes críticos en TRANSICIONES DE FASE DIMENSIONALES y comparar nuestros modelos teóricos con la realidad exterior.

57. En los últimos años, LA FÍSICA EN DOS DIMENSIONES nos ha deparado ya algunos descubrimientos inesperados;
58. ENTRE OTROS, la naturaleza especial de la fusión superficial o efecto Hall cuántico, por el cual Klaus von Klitzing recibió el premio Nobel en 1985.

PÁRRAFO 11

59. Si sólo fuera ÉSA la razón para estudiar superficies de sólidos, nuestra especialidad no habría pasado de ser una curiosidad académica.
60. La razón fundamental DEL FLORECIMIENTO DE LA FÍSICA DE SUPERFICIES reside en su utilidad práctica en algunos campos tecnológicos de primerísima importancia económica como la microelectrónica, la catálisis, los tratamientos superficiales por implantación iónica o láser y la ingeniería atómica de materiales que permite la fabricación de materiales artificiales con propiedades ajustadas a nuestros deseos.
61. Para avanzar en nuestro conocimiento de ESTOS COMPLEJOS PROCESOS, conviene comenzar con UNA SUPERFICIE IDEAL y depositar sobre ella de un modo controlado las impurezas o átomos cuyo papel se desee determinar.
62. ESTO se consigue trabajando en condiciones de ultra alto vacío (UAV), donde la muestra pueda ser limpiada adecuadamente y mantenida en este estado el *tiempos suficiente para realizar los experimentos planeados.*
63. Habitualmente, la presión NECESARIA es muy reducida, del orden de 10^{-13} atmósferas, equivalente a la presión en la superficie de la Luna, y se consigue bombeando con una variedad de dispositivos un recipiente de acero inoxidable con ventanas y *puertas removibles.*

64. LA LIMPIEZA DE LA MUESTRA UNA VEZ EN UAV se consigue por bombardeo iónico con un gas noble o por rotura en vacío.

PÁRRAFO 12

65. Detengámonos en las reconstrucciones superficiales.

66. Lo mismo la posición geométrica de los átomos, que la distribución energética de los estados electrónicos en las proximidades de LA SUPERFICIE de un cristal, difieren en general, de su posición y distribución en el interior del volumen.

67. Débese ELLO a la rotura de la simetría y a la distinta coordinación de los átomos de la superficie con respecto a los del volumen.

68. Si nos imaginamos UN CRISTAL METÁLICO como un conjunto de bolas de acero unidas con muelles y cortamos éstos a lo largo de un plano para formar UNA SUPERFICIE, no es difícil entender intuitivamente que los átomos de la superficie puedan moverse con respecto a las posiciones de equilibrio del volumen, ya que ahora no tienen vecinos hacia el exterior del cristal.

69. Los cambios estructurales que ocurren en LA REGIÓN SUPERFICIAL pueden implicar a varias capas atómicas.

70. Se dice que LA SUPERFICIE se ha reconstruido.

PÁRRAFO 13

71. ESTE EFECTO se produce también en las superficies de los semiconductores, aunque por distintas razones.

72. Al cortar un cristal de UN SEMICONDUCTOR para formar UNA SUPERFICIE, aparecen enlaces direccionales rotos, que representan una enorme energía.
73. Para rebajarLA, los átomos que se encuentran en LA SUPERFICIE se desplazan bastante de las posiciones equivalentes a las que ocuparían en el volumen.
74. EN EL CASO DE LA SUPERFICIE (100) DEL SILICIO, LOS ÁTOMOS se juntan de dos en dos formando dímeros, lo cual reduce a la mitad el número de enlaces insatisfechos.
75. LOS ENLACES NO SATISFECHOS que quedan forman estados electrónicos de superficie dentro del intervalo prohibido de energías del semiconductor [veáse la figura 5].
76. ESTOS ESTADOS DE SUPERFICIE acumulan carga eléctrica e influyen en el funcionamiento de los dispositivos electrónicos.
77. SON, entre otras cosas, los responsables del fenómeno de fijación («pinning») del nivel de Fermi, esto es, la independencia de la función de trabajo (mínima energía requerida para extraer un electrón del cristal) del silicio con respecto al nivel de dopado del volumen.

PÁRRAFO 14

78. Las propiedades electrónicas de UNA SUPERFICIE SEMICONDUCTORA pueden modificarse depositando átomos de otra especie química sobre ella.
79. ASÍ, al adsorber MEDIA MONOCAPA DE UN METAL ALCALINO, COMO POTASIO O CESIO, SOBRE LA CARA (100) DE SILICIO, se produce una drástica disminución de la función de trabajo.

80. ESTE FENÓMENO es esencial para la construcción de detectores de radiación electromagnética en la región de los infrarrojos.

PÁRRAFO 15

81. LOS DETECTORES ÓPTICOS han constituido un área de investigación privilegiada ya desde la época de Langmuir.

82. UN DETECTOR EFICIENTE DE RADIACIÓN INFRARROJA es el corazón de cualquier sistema de visión nocturna, de detección de tumores o de astronomía infrarroja.

83. Puede fabricarse UN DETECTOR SEMEJANTE mediante un substrato semiconductor (silicio o arseniuro de galio) en el cual se ha hecho disminuir la función de trabajo por evaporación de óxidos de metales alcalinos sobre su superficie.

84. LA DISMINUCIÓN debe ser tal que el nivel de energía del vacío en el exterior de la superficie se encuentre por debajo de la banda de conducción en el volumen.

85. ESTO es lo que se conoce como afinidad electrónica negativa (AEN).

86. EN ESTAS CONDICIONES, un fotón de energía mayor que el intervalo prohibido del semiconductor produce, al ser absorbido por el material, un par electrón-hueco.

87. LOS ELECTRONES pueden emitirse al exterior del dispositivo.

88. DE ESTE MODO, se transforma la radiación infrarroja en corriente eléctrica, que puede luego manipularse de manera conveniente hasta resultar en la imagen visible de la fuente de radiación [véase la figura 8].

PÁRRAFO 16

89. En el curso de una investigación destinada a aclarar la estructura microscópica de ESTOS FOTOCÁTODOS, Eva Oellig y Enrique G. Michel, entonces estudiantes de doctorado del laboratorio de física de superficies de la Universidad Autónoma de Madrid (LASUASM), demostraron que los metales alcalinos actuaban como catalizadores de la oxidación de semiconductores, acelerando la cinética y haciendo disminuir la temperatura del proceso.
90. Los átomos DEL CATALIZADOR podían, ADEMÁS, eliminarse por completo de la superficie mediante un breve calentamiento a temperatura moderada.
91. ESTO ha sugerido la posible aplicación práctica de ESTE NUEVO MÉTODO para la producción de óxidos de puerta de espesor controlado en las próximas generaciones de dispositivos microelectrónicos.
92. PARA ELLO, es necesario comprobar la composición y microestructura de LOS ÓXIDOS DE SILICIO ASÍ PRODUCIDOS y compararlos con los desarrollados por los métodos habituales en la industria.

PÁRRAFO 17

93. La composición química de ESTOS ÓXIDOS, como la de cualquier muestra sólida, puede ser objeto de análisis por espectroscopía de fotoelectrones.
94. EN ESTA TÉCNICA, heredera directa del efecto fotoeléctrico, se envía un haz monocromático de rayos X (por ejemplo, la radiación Mg Ka, con una energía de 1253,6 electronvolt) sobre la muestra, donde arranca electrones de los niveles electrónicos profundos.

95. La energía cinética de LOS FOTONES es la diferencia entre la energía de los fotones y la energía de ligadura de los electrones en el sólido.
96. ESTAS son características del elemento químico al que pertenece el electrón y de su estado químico.
97. POR TANTO, midiendo LA ENERGÍA DE LOS FOTOELECTRONES EMITIDOS AL VACÍO se obtiene un espectro con picos a ciertas energías, cuyas alturas relativas reflejan la composición de la muestra analizada.
98. EN EL CASO QUE NOS OCUPA, el óxido de silicio producido por oxidación catalítica tiene una composición química (SiO_2) idéntica a la del óxido térmico preparado a alta temperatura en atmósfera de oxígeno.

PÁRRAFO 18

99. El microscopio de efecto túnel (STM), descubierto por Binnig y Rohrer (por lo que fueron galardonados con el premio Nobel en 1985), nos ofrece una visión sorprendente de LA MICROESTRUCTURA DE LOS ÓXIDOS PREPARADOS POR OXIDACIÓN CATALÍTICA.
100. La imagen de la figura 7, tomada por Amadeo L. Vázquez de Parga y Carmen Ocal, sugiere que EL ÓXIDO DE SILICIO CATALÍTICO ha crecido a través de una reacción química de estado sólido entre los óxidos del metal alcalino y el sustrato de silicio.
101. LA REACCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL OXÍGENO ENTRE EL METAL ALCALINO Y EL CRISTAL SEMICONDUCTOR tiene un fuerte carácter local, que da lugar a la aparición de los aglomerados circulares visibles en la imagen del STM.

PÁRRAFO 19

102. Como consecuencia inesperada del esfuerzo realizado para controlar LA ACTIVACIÓN DE FOTOCÁTODOS, se han hecho recientemente avances muy importantes en nuestra comprensión del proceso de formación de la barrera Schottky en la interfase metal-semiconductor.
103. ESTA BARRERA ENERGÉTICA es responsable de la actividad rectificadora de la unión metal-semiconductor descubierta por K.F. Braun hace más de un siglo.
104. La explicación microscópica de la formación de LA BARRERA SCHOTTKY se había convertido en una piedra de toque para la física de superficies.
105. EN EFECTO, las pruebas experimentales indicaban que una sola capa atómica de metal depositada sobre la superficie del semiconductor bastaba para producir LA MISMA BARRERA SCHOTTKY encontrada en los diodos y dispositivos comerciales.
106. Los investigadores habían concluido que, en la interfase, había unos estados electrónicos, localizados en el intervalo de energía, en el interior de la zona prohibida DEL SEMICONDUCTOR;
107. ÉSTOS fijaban la posición energética del nivel de Fermi, determinando así la altura de la barrera.

PÁRRAFO 20

108. AHORA BIEN, ¿cuál era el origen de ESTOS ESTADOS?
109. UN LARGO CONTENCIOSO se había estado desarrollando entre dos escuelas de pensamiento.

110. UNA DE ELLAS, representada por Bill Spicer, de la Universidad de Stanford, consideraba que los estados que fijaban la posición de nivel de Fermi estaban producidos por defectos introducidos en el sustrato durante la deposición del metal.
111. LA OTRA ESCUELA se originó en una idea de Volker Heine, de la Universidad de Cambridge, desarrollada y perfeccionada por Fernando Flores, de la UAM.
112. ESTA proponía que el simple hecho de tener un metal en contacto con un semiconductor inducía estados electrónicos en el intervalo de energía prohibido.
113. EL CARÁCTER METÁLICO de la capa absorbida sería, POR TANTO, DETERMINANTE.

PÁRRAFO 21

114. Un elegante experimento diseñado y realizado por José Enrique Ortega, del LASUAM, en colaboración con Clemens Laubschat, Mario Priestch y Gunter Kaindl, del centro de radiación de sincrotrón BESSY en Berlín, ha arrojado luz sobre LA CUESTIÓN DEBATIDA.
115. Para evitar la formación de defectos, era preciso asegurarse de que LA ADSORCIÓN DEL METAL no dañaba la red DEL SEMICONDUCTOR;
116. para comprobar el papel de LA METALICIDAD, se requería una capa depositada cuyo carácter metálico pudiera encenderse y apagarse a voluntad.
117. LA PRIMERA CONDICIÓN se conseguía evaporando cesio a baja temperatura sobre arseniuro de galio;

118. LA SEGUNDA, adsorbiendo oxígeno sobre la capa metálica, lo que producía óxidos de cesio de carácter aislante.
119. LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES demostraron que, si bien la presencia de defectos en suficiente densidad podía fijar el nivel de Fermi, éstos no eran necesarios en absoluto para explicar lo que ocurría.
120. El carácter metálico de la capa depositada sobre la superficie semiconductor perfecta era, DE HECHO, LA CONDICIÓN BÁSICA REQUERIDA.

PÁRRAFO 22

121. LA MAYORÍA DE LOS SEMICONDUCTORES USADOS EN LA TECNOLOGÍA MODERNA son, DE HECHO, monocristales, razón por la cual la aplicación directa de los descubrimientos de física básica de superficies resulta casi inmediata.
122. EN CAMBIO, LA MAYORÍA DE LOS METALES DE USO COTIDIANO, desde un tenedor hasta las pistas de metalización de un circuito integrado, son POLICRISTALES:
123. SUS superficies están constituidas, PUES, por una variedad de planos cristalinos.
124. A PESAR DE ELLO, los investigadores han conseguido desarrollar («crecer» en el argot) en los laboratorios MONOCRISTALES METÁLICOS y cortarlos adecuadamente para exponer una sola cara cristalina.
125. La información obtenida DE ESTE MODO es crucial para comprender el funcionamiento de las superficies reales, incluso en propiedades tan complejas como la actividad catalítica.

PÁRRAFO 23

126. LOS CATALIZADORES de reacciones heterogéneas están compuestos por pequeños aglomerados metálicos dispersados, para aumentar su superficie, sobre substratos de alúmina o zeolita.
127. En la práctica, LOS CATALIZADORES son «promovidos» por aditivos que contienen metales alcalinos, especialmente potasio, con el fin de mejorar la selectividad o la reactividad del catalizador.
128. Entre los ejemplos bien conocidos de REACCIONES ASÍ CATALIZADAS citaremos la síntesis Fischer Tropsch de hidrocarburos a partir de mezclas de CO y H₂, o la eliminación del CO y NO de los gases de los tubos de escape de los automóviles.
129. El papel exacto de LOS PROMOTORES ALCALINOS ha sido muy debatido en los últimos años.
130. Las técnicas de la física de superficies han hecho algunas importantes aportaciones a nuestra comprensión de LOS PROCESOS CATALÍTICOS.

PÁRRAFO 24

131. En un trabajo del autor en colaboración con el grupo de Gerhard Ertl, entonces en la Universidad de Munich se ha desarrollado un método para determinar la orientación de moléculas quimisorbidas sobre substratos metálicos.
132. PARA ELLO es necesario emplear las propiedades únicas de la radiación de sincrotrón

133. [véase «LA RADIACIÓN DE SINCOTRÓN» por Herman Winick; INVESTIGACION Y CIENCIA, enero de 1988]
134. EN PARTICULAR, EL HECHO DE QUE ESTA RADIACIÓN se halle totalmente polarizada en el plano de la órbita de los electrones.
135. Al enviar fotones de una energía dada sobre la muestra, se extraen ELECTRONES de cada uno de los orbitales moleculares accesibles.
136. ESTOS FOTOELECTRONES son colectados por un analizador bidimensional que mide cuántos electrones de cierta energía cinética se emiten en cada dirección del espacio.

PÁRRAFO 25

137. Las reglas cuánticas de selección obligan a que el estado inicial y final DEL PROCESO DE FOTOEMISIÓN tengan una simetría adecuada.
138. Supongamos una molécula CON UN EJE DE SIMETRÍA (como el monóxido de carbono, CO), adsorbida perpendicularmente a la superficie.
139. EN ESE CASO, no se emitirían fotoelectrones, DESDE LOS ORBITALES MOLECULARES, a lo largo de las direcciones espaciales correspondientes al plano perpendicular al vector campo eléctrico de la radiación incidente.
140. ASÍ se ha determinado que el monóxido de carbono se adsorbe con su eje C-O perpendicular a la superficie de un cristal de paladio limpio.
141. Al depositar potasio sobre LA SUPERFICIE DEL PALADIO, las moléculas de CO adsorbidas en las proximidades de los átomos del promotor se encuentran notablemente inclinadas con su eje formando un ángulo de más de 20 grados con respecto a la normal a la superficie.

142. ESTOS RESULTADOS indican que el papel de los promotores podría ser el de inclinar el eje interatómico de las moléculas adsorbidas, lo cual alarga su distancia internuclear, debilita su enlace y facilita su disociación.

PÁRRAFO 26

143. Como hemos mencionado antes, cabe esperar que las propiedades colectivas (superconductividad, magnetismo) de la superficie difieran bastante de las mismas en el volumen.

PÁRRAFO 27

144. Una de las magnitudes que define LAS PROPIEDADES MAGNÉTICAS DE UN SÓLIDO es la temperatura de Curie, T_c .
145. POR ENCIMA DE ELLA, EL MATERIAL deja de comportarse como un imán, esto es, la magnetización se hace cero.
146. LA TEMPERATURA DE CURIE puede medirse experimentalmente determinando a qué temperatura desaparece el ciclo de histéresis característico de un material ferromagnético.
147. Es posible explorar el efecto de la dimensionalidad en EL COMPORTAMIENTO MAGNÉTICO estudiando las propiedades, por ejemplo LA TEMPERATURA DE CURIE, de capas muy delgadas de MATERIAL FERROMAGNÉTICO en función de su espesor.
148. PARA ELLO es preciso seleccionar LOS MATERIALES ADECUADOS y prepararlos apropiadamente.

149. Recientemente, siguiendo una sugerencia de Félix Ynduráin, de la UAM, que ha calculado que la interacción electrónica entre cobalto y cobre es extremadamente pequeña, se ha realizado ESTE EXPERIMENTO desarrollando epitaxialmente películas de un material magnético (cobalto) sobre un sustrato monocristalino de un material no magnético (cobre).

PÁRRAFO 28

150. El número de capas atómicas depositadas **SOBRE EL SUBSTRATO** se puede determinar con precisión exquisita, midiendo la intensidad reflejada de un haz de átomos de helio que se hace incidir sobre la superficie de cristal, mientras éste está creciendo.
151. **LA TÉCNICA** se muestra extraordinariamente sensible al orden superficial, ya que los átomos de helio, al ser neutros, no pueden penetrar dentro de la superficie y rebotan como bolas de billar sobre ella.
152. **LA INTENSIDAD REFLEJADA** oscila durante la evaporación siendo máxima cuando se completa una capa atómica y mínima justo cuando se ha depositado media monocapa.
153. Basta, PUES, contar **LAS OSCILACIONES** para saber el número de capas de átomos que se han depositado.
154. Cuando el cristal del sustrato se ha preparado de una manera cuidadosa, es posible desarrollar **CAPAS BIDIMENSIONALES** de alta perfección estructural.
155. ASÍ, Juan José de Miguel, del LASUAM, en un trabajo conjunto con el grupo de J. Kirschner, de la Universidad Libre de Berlín, ha determinado la temperatura de Curie de **CAPAS ULTRACONGELADAS DE COBALTO DE ESPESOR VARIABLE CRECIDAS EPITAXIALMENTE SOBRE COBRE**.

156. HAN OBTENIDO unos resultados sorprendentes.
157. LA TEMPERATURA DE CURIE DE PELÍCULAS DELGADAS es mucho menor que la del material masivo y, además varía notablemente con el espesor evaporado.
158. Se necesitan de cinco a seis capas de átomos para alcanzar LA TEMPERATURA DE CURIE del volumen.
159. MÁS SORPRENDENTE AÚN es el hecho de que una extrapolación lineal de los datos experimentales sugiera que LA TEMPERATURA DE CURIE DE UNA SOLA CAPA ATÓMICA DE COBALTO sea de cero grados Kelvin;
160. ESTO ES, UNA CAPA ESTRICTAMENTE BIDIMENSIONAL no presentaría orden magnético a ninguna temperatura finita.

PÁRRAFO 29

161. ESTOS RESULTADOS nos han permitido explorar un terreno de gran interés práctico.
162. EN EFECTO, la industria que utiliza el almacenamiento magnético de información demanda EL DESARROLLO DE SOPORTES MATERIALES QUE PUEDAN CONTENER CADA VEZ MAYOR CANTIDAD DE INFORMACIÓN.
163. EN PARTICULAR, sería muy conveniente poder ALMACENAR INFORMACIÓN MAGNÉTICA en tres dimensiones.
164. PARA ELLO deberíamos disponer de nuevos materiales con alta anisotropía estructural y magnética

165. [véase «MATERIALES ELECTRÓNICOS Y MAGNÉTICOS», por Prahaven Claudhari, INVESTIGACION Y CIENCIA, diciembre de 1986].
166. UNA ESTRATEGIA extendida en la actualidad consiste en desarrollar, en condiciones de ultra alto vacío, cristales sintéticos de periodicidad artificial: las superredes.
167. UNA SUPERRED METÁLICA está formada por capas delgadas alternadas de dos metales A y B, de distintas propiedades.
168. EN EL CASO QUE NOS OCUPA, A sería un material magnético y B un metal no magnético.
169. LOS ÁTOMOS DE AMBOS METALES se evaporan cuidadosamente sobre un soporte elegido, para que el crecimiento de ambos sea epitaxial y sus periodicidades verticales bien definidas.
170. DE ESTE MODO, se consigue desarrollar cristales con las periodicidades deseadas de fases que no existen en la naturaleza o que son metaestables.
171. La exploración de las propiedades magnéticas de ESTOS NUEVOS MATERIALES no ha hecho más que comenzar, y ya nos ha suministrado varias sorpresas, indicio de que algo excitante se esconde en la naturaleza cuando nuestro control sobre ella alcanza este nivel de refinamiento.

PÁRRAFO 30

172. En un esfuerzo reciente del laboratorio de superficies de la UAM - A. Cebollada y J. M. Gallego han desarrollado multicapas cristalinas de COBALTO/COBRE por evaporación alternada sobre la cara (100) de monocristales de cobre.

173. El espesor de COBALTO repetido periódicamente ha superado siempre la cifra de seis capas atómicas, de suerte que cada unidad estructural de la superred alcanzase las propiedades magnéticas del volumen.
174. El número de CAPAS EVAPORADAS y su perfección estructural se han determinado mediante la técnica de oscilaciones en la intensidad reflejada de haces de helio descrita más arriba.
175. Las propiedades magnéticas de ESTAS SUPERREDES METÁLICAS, estudiadas en colaboración con J.L. Martínez mediante difracción de neutrones en el Instituto Laue-Langevin, han resultado ser inesperadas.
176. En ausencia de un campo magnético exterior, LA SUPERRED se comporta como un material antiferromagnético, esto es, el vector magnetización de las capas de cobalto, que se encuentra siempre en el plano de éstas, está ordenado antiparalelamente en capas consecutivas [véase la figura 12].
177. EN ESTAS CONDICIONES, LA SUPERRED en su conjunto no presenta magnetización alguna.

PÁRRAFO 31

178. Al aplicar un campo magnético exterior de intensidad elevada en la dirección paralela al plano de las capas, éstas se ordenan magnéticamente en la dirección del campo externo y LA SUPERRED se convierte en ferromagnética.
179. SIN EMBARGO, LO MÁS INTERESANTE ocurre cuando EL CAMPO EXTERNO se aumenta de una manera suave.
180. PARA CIERTOS VALORES BIEN DEFINIDOS DE ÉSTE, la magnetización de la superred parece crecer de una manera discreta.

181. ESTO sugiere que, aplicando un campo magnético exterior de esta magnitud, es preciso crear complejos patrones de magnetización EN LA SUPERRED.
182. La aplicación práctica de ESTOS DESCUBRIMIENTOS para el almacenamiento de información no está aún a la vista, pero es indiscutible que nuestra capacidad de explorar la física de sistemas de baja dimensionalidad está abriendo por primera vez un mundo fascinante a nuestros ojos.

PÁRRAFO 32

183. LOS EJEMPLOS RESEÑADOS EN ESTE ARTÍCULO describen parte del esfuerzo realizado en los últimos años en el laboratorio de superficies de la UAM.
184. Aunque NO CUBREN toda la riqueza de la física de superficies e interfase, sí pueden considerarse representativos de la fase explosiva de crecimiento que ésta atraviesa desde hace unos años en todo el mundo.
185. Benevolentemente, podría calificarse la situación actual de ESTA DISCIPLINA como de adolescencia.
186. Los próximos años conducirán, con toda probabilidad, a UNA ETAPA DE MADUREZ en la que la comprensión y el control de la naturaleza, en su nivel atómico, que estamos alcanzando, fructificará en nuevos y espectaculares desarrollos básicos y aplicados.

ANEXO 8

TRANSICIONES DE FASE EN LAS PEROVSKITAS

0. La sencillez estructural de ESTOS COMPUESTOS ha permitido establecer relaciones entre sus variaciones de simetría, transiciones de fase y propiedad físicas

PÁRRAFO 1

1. LAS PEROVSKITAS han suscitado interés en dos campos distintos, aunque complementarios.
2. EN CIENCIA BÁSICA, ESTOS MATERIALES han tenido carácter pionero en el descubrimiento y comprensión de muchos fenómenos del estado sólido, como la ferroelectricidad, asociándolos a cambios en los estados o posiciones de los átomos constituyentes.
3. EN EL DOMINIO DE LA TECNOLOGÍA, ALGUNOS MATERIALES CON ESTRUCTURA DE PEROVSKITAS son utilizados como sensores, componentes electrónicos, abrasivos y otros, de obvio interés económico.
4. DE HECHO, CON LAS PEROVSKITAS se ha producido un proceso de realimentación, por el cual las aplicaciones técnicas han incentivado la ciencia fundamental y viceversa.

PÁRRAFO 2

5. Con la aparición de los superconductores de alta temperatura crítica se ha renovado el interés en LAS PEROVSKITAS.

6. Materiales como $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_{4-\delta}$ o $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, en los que se produjeron LOS PRIMEROS HALLAZGOS, presentan estructuras derivadas de TALES COMPUESTOS.
7. EN ESTOS MATERIALES se evidencia el paradigma ciencia-tecnología;
8. existe un interés CIENTÍFICO básico, ya que no se conoce bien el mecanismo que produce la superconducción, y un interés TECNOLÓGICO, porque sus propiedades pueden revolucionar la industria eléctrica y electrónica.
9. EN EFECTO, desde hace cuatro años se vive una auténtica carrera mundial en la obtención de SUPERCONDUCTORES con mayor temperatura crítica (superior a 200 grados Kelvin en el $\text{Y}_5\text{Ba}_6\text{Cu}_{11}\text{O}_4$ cuando se publica este artículo), y con corrientes críticas competitivas similares a los materiales convencionales, así como en la búsqueda de posibles aplicaciones.
10. Con nuestros antecedentes de trabajo en perovskitas, ha resultado natural participar, en colaboración con otros laboratorios nacionales y extranjeros, en el estudio de LOS NUEVOS SUPERCONDUCTORES.

PÁRRAFO 3

11. En este artículo pretendemos ilustrar las propiedades más relevantes de LAS PEROVSKITAS, mostrar los cambios de fase más característicos, la variación de propiedades que producen y las herramientas experimentales que permiten su estudio.
12. ADEMÁS, se avanza, a la luz de los conocimientos actuales, las causas microscópicas de LOS COMPORTAMIENTOS OBSERVADOS.

PÁRRAFO 4

13. ¿Qué son las perovskitas?

14. Se da el nombre de PEROVSKITAS a varias familias de materiales naturales y sintéticos, de estructura semejante a la del mineral perovskita CaTiO_3 .

15. EN UNA PEROVSKITA CÚBICA IDEAL ABX_3 , los átomos A [véase la figura 1a] se sitúan en los vértices del cubo, los B en su centro y los X en el centro de las caras.

16. LA ESTRUCTURA está formada por grupos octaédricos, BX_6 , muy estables, lo que permite una descripción poliédrica de la red cristalográfica como un conjunto de octaedros enlazados por sus vértices, donde los átomos A ocupan el centro de los espacios intermedios

17. [véase la figura 1b].

18. La variedad posible de componentes básicos de LAS PEROVSKITAS, A, B, X, hace que el material pueda estar agregado por interacciones de distinta intensidad y carácter, dando lugar a propiedades diferentes según sea su constitución cristalográfica, magnética o eléctrica, es decir, sus fases.

19. ASÍ cuando X es un anión como flúor (F^-), cloro (Cl^-) o bromo (Br^-), y A y B, cationes, da lugar a compuestos iónicos que serán buenos aislantes eléctricos.

20. SIN EMBARGO, se pueden obtener PEROVSKITAS CON ENLACE ESENCIALMENTE METÁLICO, y por ello conductores eléctricos, como en los compuestos intermetálicos de manganeso (Mn) con nitrógeno, Mn_3MN , y carbono, Mn_3MC , donde M es un metal de transición.

PÁRRAFO 5

21. Ningún científico cuestiona que el conocimiento completo de las interacciones elementales entre LOS COMPONENTES DE LA MATERIA permite predecir y caracterizar nuevas fases, analizar procesos de cambio y comprender los mecanismos que lo producen.
22. SIN EMBARGO, TODO INVESTIGADOR sabe igualmente que ESTA TAREA, objeto de la física de estado sólido, no es posible sin simplificaciones, y una de las mayores ayudas son el orden periódico inherente al estado cristalino y la simetría.
23. OTRA SIMPLIFICACIÓN IMPORTANTE es la relativa a la localización de los electrones;
24. POR ESO, consideraremos en este artículo, por orden, las perovskitas aislantes (CON ELECTRONES LOCALIZADOS), las conductoras eléctricas (CON ELECTRONES DESLOCALIZADOS), los óxidos con estructura de perovskita, cuyos representantes cubren ambos extremos, y, finalmente, los nuevos óxidos superconductores.

PÁRRAFO 6

Aislantes eléctricos

25. Empecemos por LAS PEROVSKITAS EN CUANTO AISLANTES ELÉCTRICOS.
26. EN CUALQUIER MATERIAL, uno de los mecanismos fundamentales de absorción de energía es la variación del estado de movimiento de los átomos que lo constituyen.

27. La mayor intensidad de enlace B-X de los octaedros BX_6 facilita el estudio de LAS VIBRACIONES ATÓMICAS COLECTIVAS DE LAS PEROVSKITAS (modos fonónicos), porque permite su clasificación en modos internos de octaedros aislados y en movimientos relativos de los octaedros aislados y en movimientos relativos de los octaedros y de los átomos de la subred A.

PÁRRAFO 7

28. LA MAYORÍA DE LAS PEROVSKITAS CÚBICAS, al bajar la temperatura, sufren deformaciones que pueden describirse como giros de los octaedros alrededor de sus diagonales o como distorsiones de su regularidad.

29. Más allá de la descripción de LAS ESTRUCTURAS DEFORMADAS, nos interesa su evolución, lo que exige conocer las posiciones atómicas y sus oscilaciones.

30. EN LAS PEROVSKITAS, LOS MODOS FONÓNICOS M_3 Y R_{25} adquieren especial interés, razón por la cual los describimos a continuación.

31. Si, EN UNA CAPA DE OCTAEDROS [véase la figura 2] uno de ellos gira hacia la izquierda alrededor de la diagonal perpendicular a la capa, al compartir vértices los cuatro adyacentes giran hacia la derecha y originan un movimiento de vaivén coherente.

32. A SU VEZ, LOS OCTAEDROS DE LAS CAPAS INMEDIATAS SUPERIOR E INFERIOR pueden oscilar a la par (modo M_3) o en oposición (modo R_{25}).

33. ESTOS MOVIMIENTOS COORDINADOS se llaman «modos normales» de la red y cualquier movimiento de los átomos que constituyen pueden describirse como la superposición de todos los modos normales posibles.

PÁRRAFO 8

34. LA SITUACIÓN MÁS SIMPLE se da, POR EJEMPLO, en la perovskita KZnF_3 , que mantiene la simetría cúbica a cualquier temperatura y no sufre transición de fase alguna.
35. POR ELLO, ES un material ideal para contrastar sus propiedades con las del resto de la serie.
36. La energía DE LOS MODOS NORMALES DE VIBRACIÓN puede estudiarse directamente mediante la técnica de dispersión inelástica de neutrones.
37. Si se bombardea con UN HAZ DE NEUTRONES y se analiza la ganancia o pérdida de energía de LOS NEUTRONES DISPERSADOS, se obtienen las energías de vibración características de los modos fonónicos.
38. Los efectos de la absorción de ENERGÍA se reflejan globalizadamente en LA CAPACIDAD CALORÍFICA, cociente entre la energía térmica que se absorbe y el aumento de temperatura que provoca.
39. Las medidas de DISPERSIÓN DE NEUTRONES junto con las de CAPACIDAD CALORÍFICA han demostrado que la descripción de las propiedades físicas de ESTA PEROVSKITA puede hacerse mediante modos fonónicos.
40. ADEMÁS, se ha probado la práctica ausencia de anarmonicidad EN EL KZnF_3 ;
41. ESTO ES, LOS ENLACES INTERATÓMICOS actúan como si fueran muelles elásticos.

PÁRRAFO 9

42. EN OTROS CASOS, al bajar LA TEMPERATURA, la frecuencia de un tipo de oscilación de los octaedros tiende a cero y la amplitud de dicho movimiento de vaivén disminuye hasta llegar a detenerse, quedando cada octaedro girado respecto de su posición original.
43. ESTE HECHO se denomina ablandamiento o condensación de un modo y permite predecir la deformación final de la estructura.
44. La disminución y desaparición de LA OSCILACIÓN se debe, en general, a falta de armonicidad en los enlaces, a la existencia de más de una posición de equilibrio de los átomos o ambas causas.
45. La reducción de la simetría cúbica por ablandamiento de alguno de LOS MODOS DE VIBRACIÓN conduce a variaciones en las posiciones de los iones; variaciones que suelen asociarse a cambios múltiples en sus propiedades .

PÁRRAFO 10

46. Un ejemplo característico de LA SITUACIÓN MENCIONADA se observa en el BaTiO_3 .
47. Al disminuir la temperatura, LA CELDA ELEMENTAL pasa de simetría cúbica a tetragonal por alargamiento de una de las aristas, posteriormente se alarga una de las diagonales de las caras adquiriendo simetría ortorrómbica y, por último, se alarga una de las diagonales del cuerpo, dando lugar a simetría romboédrica.
48. Los iones titanio (Ti^{4+}), partiendo de la posición que ocupan en SIMETRÍA CÚBICA, al bajar la temperatura se desplazan en las direcciones citadas.

49. A LAS TEMPERATURAS en que se producen las transiciones de fase (cambios de SIMETRÍA), la permitividad eléctrica, la capacidad calorífica y la expansión térmica, entre otras magnitudes físicas, varían de forma anómala.
50. EN CONCRETO, en LA PRIMERA TRANSICIÓN A 393 GRADOS KELVIN aparecen dipolos eléctricos que se alinean de manera espontánea (fase ferroeléctrica), y la permitividad eléctrica aumenta considerablemente.
51. POR OTRO LADO, EN LAS TRANSICIONES A TEMPERATURAS INFERIORES se producen cambios discontinuos en el valor y dirección de los momentos dipolares, aunque el material sigue siendo ferroeléctrico.

PÁRRAFO 11

52. En el caso de que se produzca una gran deformación en el transcurso de UNA TRANSICIÓN DE FASE, aparece un efecto secundario.
53. El material se rompe o fractura en dominios cristalográficos, cuyos ejes principales en LA FASE DEFORMADA coinciden con los equivalentes en la fase de simetría superior.
54. Una vez que EL CRISTAL se ha dividido en pequeños dominios o maclas, la transición de FASE se produce abruptamente.
55. ESTA CARACTERÍSTICA dificulta a menudo el estudio y la aplicación de estos materiales.

PÁRRAFO 12

Presencia de momentos magnéticos.

56. LA PRESENCIA DE MOMENTOS MAGNÉTICOS localizados en los cationes B añade grados de libertad al sistema y posibilidades de acoplamiento con los octaedros, aumentando el número de posibles fases.
57. El acoplamiento más débil entre la red cristalina y LOS MOMENTOS MAGNÉTICOS se presenta en iones con estructura electrónica similar a la del ion manganeso (Mn^{2+}).
58. Un prototipo de ESTE COMPORTAMIENTO sería el caso de $RbMnF_3$, compuesto que tiene estructura cúbica ideal en todo el rango de temperatura.
59. LOS MOMENTOS MAGNÉTICOS de los Mn próximos interactúan por intercambio electrónico a través de puentes Mn-F-Mn (interacción de superintercambio);
60. EL EFECTO NETO consiste en que LOS MOMENTOS MAGNÉTICOS VECINOS tienden a orientarse antiparalelamente.
61. Por debajo de la temperatura crítica ($T_N = 83$ grados Kelvin), llamada temperatura de Neel, la interacción induce SU ORDENAMIENTO sin que haya cambio de simetría ni otras variaciones apreciables en la red cristalográfica.
62. Hay dos subredes cúbicas, interpenetrantes, idénticas y con compensación exacta de MOMENTOS (antiferromagnetismo).

PÁRRAFO 13

63. En el $KMnF_3$ la sustitución del ion rubidio (Rb^+) por potasio (K^+), más pequeño, inestabiliza LA RED y se producen sucesivas transiciones de fase, independientemente de la interacción magnética.

64. Partiendo de LA FASE cúbica de alta temperatura [figura 3a], la condensación del modo R_{25} a 186 grados Kelvin conduce a una fase distorsionada tetragonal [figuras 3b y 3c].
65. El modo M_3 que sigue activo A DICHA TEMPERATURA, se ablanda a 91 grados K y sus distorsión se superpone a la anterior [figura 3d].
66. AHORA BIEN, como el sentido de la rotación del MODO M_3 respecto del R_{25} coincide en una capa y se opone en la siguiente el ángulo total girado por los octaedros aumenta y disminuye en capas alternas, respectivamente.
67. A TEMPERATURAS AÚN MÁS BAJAS, 81,5 GRADOS K, se produce una distorsión de los propios octaedros, que dejan de ser regulares.
68. ESTAS TRANSICIONES se reflejan en las medidas de dilatación térmica y susceptibilidad magnética de monocristales [figura 3].

PÁRRAFO 14

69. En la fase cúbica, los momentos están desordenados (fase paramagnética), LAS TRANSICIONES estructurales no causan efectos magnéticos detectables y el ordenamiento magnético se produce espontáneamente a 88 grados K, sin cambio estructural asociado.
70. SIN EMBARGO, POR DEBAJO DE ESTA TEMPERATURA los iones Mn^{2+} ocupan cuatro posiciones no equivalentes y, a su vez, cada momento magnético tiene su dirección fija dentro del octaedro.
71. Como consecuencia de ELLO se forman cuatro subredes magnéticas [figura 3e].

72. A MÁS BAJA TEMPERATURA se produce descompensación de los momentos debido a una ulterior distorsión, apareciendo una fase débilmente ferromagnética [figura 3f].
73. El acoplamiento estructural y magnético, que provoca LA DISTORSIÓN de los octaedros, es débil;
74. se habla ENTONCES de origen magnetoelástico.

PÁRRAFO 15

75. En perovskitas con iones $B=Co^{2+}$, $ACoF_3$, $A=TI^+$, Rb^+ , K^+ , NH^+ , EL ACOPLAMIENTO entre momentos magnéticos y distorsiones es más intenso.
76. LA DISTORSIÓN estructural, el ordenamiento MAGNÉTICO y, en algunos casos, la aparición de débil ferromagnetismo son simultáneas.
77. ESTE MAYOR ACOPLAMIENTO MAGNETO-ESTRUCTURAL se debe a la mayor anisotropía magnética del ion cobalto (Co^{2+}).

PÁRRAFO 16

78. UN MAYOR ACOPLO ELECTRÓNICO ESTRUCTURAL se presenta en perovskitas con iones $B=Cu^{2+}$ y Cr^{2+} ;
79. EL COBRE Y EL CROMO poseen, respectivamente, un electrón o un hueco en su última capa electrónica.

80. EL ENTORNO OCTAÉDRICO disminuye su energía alargando una de sus diagonales, fenómeno que constituye el efecto Jahn-Teller estático, que debe su nombre a H. A. Jahn y E. Teller.
81. ESTE es el caso de las perovskitas KCuF_3 y KCrF_3 , cuya estructura es tetragonal porque, de partida, los octaedros individuales BF_6 están deformados a cualquier temperatura.
82. LOS OCTAEDROS, al compartir vértices, se conectan con las diagonales alargadas perpendiculares entre sí, dando simetría tetragonal.
83. EN ESTOS DOS COMPUESTOS, el efecto Jahn-Teller es tan intenso que la deformación se mantiene a cualquier temperatura y, por tanto, no hay transiciones de fase estructurales.

PÁRRAFO 17

84. POR EL CONTRARIO, otras perovskitas de cobre y cromo, como los compuestos CsCuCl_3 , CsCrCl_3 y RbCl_3 , presentan deformaciones dinámicas que dan lugar a TRANSICIONES DE FASE, y hablamos entonces de efecto Jahn-Teller dinámico.
85. EN ESTAS PEROVSKITAS los octaedros BCl_6 se apilan compartiendo caras [véase la figura 4a];
86. LA SIMETRÍA es hexagonal.
87. LA RED CRISTALOGRAFICA se considera formada por cadenas paralelas de octaedros separadas por iones Cs o Rb.

88. El efecto Jahn Teller activa el alargamiento de una diagonal por OCTAEDRO, pero a altas temperaturas es posible que resulte alargada una cualquiera de las tres diagonales equivalentes y perpendiculares X, Y, Z.
89. EL EFECTO RESULTANTE es una deformación dinámica al azar, como lo confirman las medidas de espectroscopía visible, infrarroja y EXAFS «Extended X-Ray Absorption Fine Structure») [figura 5b].
90. AHORA BIEN, la dirección de DEFORMACIÓN de cada octaedro cambia rápidamente y la difracción de rayos-X, que promedia en el tiempo las posiciones atómicas, detecta octaedros regulares.

PÁRRAFO 18

91. Al disminuir la temperatura, SE DIFICULTA hasta acabar por cesar;
92. CESA EL CAMBIO ENTRE LAS DIRECCIONES DE DEFORMACIÓN, hasta que se detiene el movimiento.
93. TODOS Y CADA UNO DE LOS OCTAEDROS quedan distorsionados en una sola de sus diagonales, fenómeno éste conocido por transición Jahn-Teller cooperativa.
94. La estructura de baja temperatura corresponderá a la organización espacial de OCTAEDROS DEFORMADOS que tenga menor energía elástica.
95. El CsCrCl_3 a 171 grados K SE DEFORMA y pasa a simetría monocíclica, en la que las diagonales deformadas de los octaedros a lo largo de las cadenas crean una secuencia ZXZYZX.

96. En el compuesto CsCuCl_3 , la transición A 423 GRADOS K conduce a UNA SECUENCIA ZXYZY, mientras que en el RbCrCl_3 hay una estructura intermedia Z (XY)Z.
97. EL PARÉNTESIS significa que, fijada la distorsión de un octaedro a lo largo de la diagonal Z, los adyacentes se deforman dinámicamente entre X e Y dando una estructura parcialmente desordenada.
98. ESTE DESORDEN estabiliza la fase intermedia, ya que cualquiera de las secuencias tiene la misma energía elástica.

PÁRRAFO 19

Transiciones de reorientación molecular

99. Los movimientos de los octaedros BX_6 y de los iones A también están acoplados y se manifiestan con mayor intensidad cuando estos últimos tienen grados de libertad adicionales.
100. UN CASO SIGNIFICATIVO se produce en perovskitas que contienen el ion amonio (NH_4^+), verbigracia, la $\text{NH}_4 \text{MF}_3$.
101. Los átomos H DEL NH_4^+ forman un tetraedro regular que gira como un todo alrededor de su centro de masas, o bien elige orientaciones preferentes cuando se acopla con la red cristalina.
102. EN PARTICULAR, EL ENLACE H-F es muy intenso, por lo que los H apuntan hacia los F.
103. A causa de la simetría cúbica, existen seis ORIENTACIONES posibles y geoméricamente distinguibles con la misma energía de enlace.

104. EN VIRTUD DE LO CUAL, el ion NH_4^+ pasa de UNA A OTRA si posee energía suficiente para saltar la barrera energética existente entre ellas [véase la figura 5a].

PÁRRAFO 20

105. Con difracción elástica de neutrones se ha determinado que los átomos de hidrógeno de CADA NH_4^+ residen en 24 posiciones situadas simétricamente dos a dos sobre las líneas N-F y que simultáneamente sólo se ocupan de cuatro en cuatro.
106. SIN EMBARGO, TODAS tienen la misma probabilidad de ser visitadas por los hidrógenos, y así lo hacen de forma dinámica mediante reorientaciones del NH_4^+ entre las seis posiciones posibles.

PÁRRAFO 21

107. Mediante dispersión cuasi-elástica de neutrones se puede medir la ganancia o pérdida de energía cuando éstos colisionan con los átomos H del NH_4^+ en rotación.
108. EL GRAN NÚMERO DE COLISIONES PRODUCIDAS da una estadística indicativa de los movimientos más frecuentes de NH_4^+ , que son giros alrededor de los ejes cuaternarios del cubo.
109. ADEMÁS, la disminución exponencial de LA FRECUENCIA DEL SALTO en la figura 5b como un ensanchamiento del espectro cuasi-elástico, permite obtener la energía de la barrera que debe superar el ion amonio para reorientarse.

PÁRRAFO 22

110. La observación directa de la dependencia de «LAS ALTURAS» DE LAS BARRERAS DE ENERGÍA con la distancia puede realizarse aplicando altas presiones hidrostáticas, que reducirán progresivamente el volumen
111. [véase «Celdilla de yunques de diamante para producir ALTAS PRESIONES», por A, Jayaraman; INVESTIGACION Y CIENCIA, junio de 1984].
112. Las medidas de espectroscopía Raman muestran un incremento importante en LA ENERGÍA DE LAS VIBRACIONES de los H en la dirección del enlace N-H al aumentar LA PRESIÓN, en contra de lo esperado si el enlace fuera exclusivamente electrostático.
113. ESTA EXPERIENCIA indica, POR TANTO, que las fuerzas interatómicas deben tener una fuerte componente repulsiva.

PÁRRAFO 23

114. UNA CARACTERÍSTICA DE LA SERIE NH_4MF_3 es la presencia de una anomalía aguda en la capacidad calorífica a la temperatura de la transición de reorientación, cuya entropía es muy superior a las observadas en otras perovskitas que no contienen amonio.
115. Curiosamente, EL CONTENIDO ENTRÓPICO es próximo al logaritmo neperiano de 3.
116. La variación de ENTROPÍA se relaciona con el logaritmo del cociente del número de orientaciones posibles antes y después de la transición.

117. Por tanto, LA PRESENCIA de SEIS ORIENTACIONES EN LA FASE de alta temperatura implicaría que en la de baja deberán existir dos orientaciones, lo que se ha confirmado en medidas del espectro Raman de las vibraciones características del NH_4^+ .

PÁRRAFO 24

118. DE TODO LO ANTERIOR resulta evidente LA EXISTENCIA de un acoplamiento fuerte entre la subred de NH_4^+ y los octaedros MF_6^- tal que, cuando éstos se deforman, arrastran a los iones amonio y provocan una reducción en sus grados de libertad previos.
119. ESE FENÓMENO se denomina transición de reorientación.

PÁRRAFO 25

Perovskitas conductoras

120. LAS PEROVSKITAS METÁLICAS Mn_3Mn derivan estructuralmente del Mn_4N .
121. El nitrógeno se enlaza fuertemente con LOS SEIS MN MÁS PRÓXIMOS y se constituye un octaedro regular muy estable.
122. LOS OCTAEDROS comparten vértices y forman así la estructura de perovskita cúbica.
123. En los intersticios entre OCTAEDROS se localizan átomos de Mn, más débilmente enlazados y de fácil sustitución por distintos metales de transición.

124. El fuerte enlace N-Mn en LOS OCTAEDROS se debe a la hibridación de orbitales electrónicos localizados p del N y d del Mn, mientras que el carácter metálico se debe a la banda de estados electrónicos s del Mn y s, p de los metales intersticiales M.

PÁRRAFO 26

125. Los modos de vibración colectiva de ESTOS OCTAEDROS son los mismos que en la perovskitas aislantes, pero el problema es más complejo porque hay bandas de electrones localizados (bandas d puras e híbridas p-d) y deslocalizados (bandas s y p) que se superponen en energía.

126. LOS ELECTRONES ocupan todos los estados de las bandas hasta llegar a la energía de Fermi, que es la máxima que puede tener un electrón a la temperatura del cero absoluto.

127. LA ENERGÍA DE FERMI es sensible a la forma de las bandas y número de electrones que aportan los metales de transición.

128. EN PARTICULAR, ESTE NÚMERO puede ser muy alto si la banda localizada proveniente de la hibridación p-d tiene una energía próxima a la de Fermi.

129. Una comprobación indirecta de ESTA PROPOSICIÓN se ha realizado con técnica XANES («X-ray Absorption Near Edge Structure») y radiación de sincrotrón, que es sensible a la densidad de estados electrónicos por encima del nivel de Fermi, detectando la presencia de una banda vacía próxima.

PÁRRAFO 27

130. La simetría cúbica posibilita la triple degeneración espacial: tres direcciones equivalentes y tres estados electrónicos con energía idéntica;
131. ADEMÁS, CADA ELECTRÓN dispone de dos estados espinoriales distintos correspondientes a los dos valores posibles del número cuántico de espín ($S_z = 1/2$), y la degeneración total es seis.
132. Cualquier interacción que rompa LA DEGENERACIÓN, esto es, que minimice la energía de algunos estados, provoca una transición.
133. POR EJEMPLO, a 1500 grados K el Mn_4N pasa de simetría hexagonal a cúbica y a 756 grados K se ordena magnéticamente.
134. EN ESTA ÚLTIMA TRANSICIÓN se rompe la degeneración espinorial y se produce UN ORDENAMIENTO FERRIMAGNÉTICO, esto es, los momentos magnéticos que son distintos en los dos tipos de Mn se alinean antiparalelamente.

PÁRRAFO 28

135. En las perovskitas Nn_3MN , donde M representa átomos de galio (Ga), cinc (Zn), cobre (Cu) o níquel (Ni), que no poseen momento magnético, EL ORDENAMIENTO debería ser MÁS SIMPLE, porque sólo intervienen los momentos de los Mn.
136. SIN EMBARGO, aparecen EFECTOS debidos a frustración en EL ORDENAMIENTO DE LOS MOMENTOS.

137. ASÍ, a 278 grados K en el $Mn_3 GaN$ y a 191 grados K en el $Mn_3 ZnN$ hay UN ORDENAMIENTO antiferromagnético triangular, con aumento de volumen y sin cambios de simetría.

PÁRRAFO 29

138. EN EL Mn_3ZnN , Y A 127 GRADOS K, hay UNA SEGUNDA TRANSICIÓN;
139. consiste ÉSTA en una contracción de volumen, cambio de estructura magnética y reducción en el valor de los momentos magnéticos, que se interpreta como un incremento en la deslocalización de los electrones de valencia.
140. La diferencia esencial entre AMBOS COMPUESTOS radica en que el Ga aporta un electrón más que el Zn, lo que conduce a la disminución del volumen de la perovskita cúbica en la fase paramagnética.

PÁRRAFO 30

141. En la sustitución de nitrógeno por carbono, LAS DIFERENCIAS ESENCIALES se deben a que este último aporta un electrón menos que el primero y a que la energía del enlace híbrido es menor.
142. Considerando CARBUROS Y NITRUROS isoelectrónicos, tales como $Mn_3 GaC$ y Mn_3ZnN (el electrón en exceso del Ga es compensado por el defecto del C), su comportamiento debiera ser SEMEJANTE.
143. Sin embargo, la energía de LOS ELECTRONES p EN LOS CARBUROS es inferior a la del orbital d del Mn que se encuentra en resonancia en el enlace híbrido, dando como consecuencia estructuras magnéticas distintas.

144. Hemos ilustrado en la figura 6 las anomalías en la capacidad calorífica producidas a una temperatura de Neel de 243 grados K por EL ORDENAMIENTO FERROMAGNÉTICO de los momentos de LOS Mn en dirección de la diagonal principal del cubo, y una TRANSICIÓN DE REORIENTACIÓN FERROANTIFERROMAGNÉTICA a 172 grados K.

PÁRRAFO 31

145. El llenado electrónico de la banda de valencia puede hacerse de forma continua, sustituyendo átomos de Mn intersticial por cinc o galio en las disoluciones sólidas $Mn_3 (Mn_xM_1x)N$.

146. En SU diagrama de fase estructural y magnético aparece una fase magnética parcialmente desordenada denominada vidrio espinorial.

147. EN ELLA los momentos magnéticos presentan viscosidad a la rotación cuando se los somete a campos magnéticos.

PÁRRAFO 32

Óxidos con estructura de perovskita

148. Aunque hemos analizado las transiciones de fase de las perovskitas aislantes y conductoras por separado, EN LOS ÓXIDOS (ABO_3) no puede aplicarse esta división, ya que no hay perovskitas como $SrVO_3$ y $LaNiO_3$ que tienen conducción metálica;

149. OTRAS, POR EJEMPLO, $LaFeO_3$ y $LaCrO_3$, son semiconductoras, y otras, $SrTi_3$ y $BaTiO_3$, se comportan como buenos aislantes.

PÁRRAFO 33

150. ADEMÁS, DETERMINADAS PEROVSKITAS se convierten en superconductoras (verbigracia $\text{BaPb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}$)³, aunque a temperaturas por debajo de los 13 grados K.
151. ESTA VARIEDAD, unida a las distorsiones estructurales, da una gama amplia de propiedades de interés y de transiciones de fase.
152. Describimos tan sólo algunos de los óxidos menos conocidos en cuanto A SUS PROPIEDADES Y ESTRUCTURA.

PÁRRAFO 34

Estructuras derivadas de la perovskita

153. TODO EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL ANTERIOR se ha basado en la consideración de los octaedros como poliedros básicos conectados por sus seis vértices.
154. Partiendo de ELLOS pueden aparecer estructuras similares en las que los octaedros poseen en común un número menor de vértices.
155. POR EJEMPLO, en el Ca_2Mn_4 LOS OCTAEDROS Mn_6 sólo comparten cuatro vértices, formando capas separadas por otras de iones Ca^{2+} , siendo la simetría tetragonal [véase la figura 7a].
156. CON ESTA GEOMETRÍA ha sido posible estudiar la dependencia de las propiedades magnéticas de un sistema cuasibidimensional gracias a la interacción, muy débil, entre capas.

PÁRRAFO 35

157. En el $\text{Ca}_3\text{Mn}_2\text{O}_7$ LOS OCTAEDROS comparten cinco vértices y forman capas dobles separadas por otras de Ca^{2+} , como en EL CASO ANTERIOR.
158. En el $\text{Ca}_4\text{Mn}_3\text{O}_{10}$ DOS TERCIOS DE LOS OCTAEDROS COMPARTEN CINCO VÉRTICES Y UN TERCIO SEIS, formándose así capas triples.
159. Caben OTRAS MUCHAS COMBINACIONES, pero todas tienen el hecho estructural común de contener la celda elemental de las perovskitas cúbicas, lo que permite su análisis siguiendo las líneas vistas hasta ahora.
160. MEDIANTE ESTA SECUENCIA DE COMPUESTOS se ha podido observar el «cruzamiento» de dimensionalidad desde el caso bidimensional al tridimensional.

PÁRRAFO 36

Superconductores de alta temperatura crítica

161. LOS SUPERCONDUCTORES DE ALTA TEMPERATURA CRÍTICA provienen de las perovskitas ABO_3 .
162. La celda elemental ortorrómbica de LA SERIE $\text{RBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (donde R sustituye al itrio o una tierra rara) está formada por una celda cúbica unidad de RCuO_3 , situada entre dos de BaCuO_3 ;
163. EN DICHA CELDA UNITARIA hay un defecto de más de dos átomos de oxígeno por fórmula unidad.
164. Al igual que en las perovskitas cúbicas, ESTOS NUEVOS SUPERCONDUCTORES sufren transiciones de fase estructurales y aparecen dominios cristalográficos.

cos en que el par de ejes a y b están orientados en distintas direcciones, esto es, se forman maclas.

PÁRRAFO 37

165. Al aplicar un campo magnético a UN SUPERCONDUCTOR se inducen supercorrientes en una capa superficial de pequeño espesor que expulsan el flujo magnético del interior del material.
166. ESTE EFECTO recibe el nombre de su descubridor, W. Meissner.
167. LA EXPULSIÓN DE FLUJO es completa si DICHO CAMPO es inferior a H_{c1} (campo crítico inferior).
168. AHORA BIEN, los superconductores de alta temperatura crítica son de tipo II;
169. ELLO quiere decir que, A CAMPOS MAGNÉTICOS MAYORES H_{c1} , el flujo magnético penetra en el material, existiendo regiones en forma de tubos que están en fase normal, rodeadas de torbellinos de corrientes superconductoras.
170. LOS TORBELLINOS pueden moverse transversalmente por la acción de campos magnéticos y de corrientes eléctricas.
171. Las tensiones locales, las fronteras de grano y otros defectos del cristal tienden a fijar los tubos de flujo y determinan los valores de LAS CORRIENTES Y CAMPOS CRÍTICOS, H_{c2} , para los cuales el material pasa al estado normal.
172. EL DIAMAGNETISMO ASOCIADO es intenso, fácilmente detectable con técnicas de medidas de susceptibilidad magnética alterna [véase la figura 8], permitiendo la determinación de temperaturas y corrientes críticas.

173. Con frecuencia ESTOS MATERIALES son cerámicos, formados por granos cristalinos en contacto (sinterizados);
174. A LOS EFECTOS ANTERIORES hay que añadir los que originan las uniones entre granos.
175. EN ESTE CASO, las corrientes eléctricas que PUEDEN SOPORTAR son menores, con lo que quedan limitadas sus posibles aplicaciones.

PÁRRAFO 38

176. La búsqueda de MATERIALES con temperatura crítica próxima a temperatura ambiente y que permitan producir hilos superconductores susceptibles de ser utilizados en aplicaciones industriales han conducido a nuevos materiales;
177. TAL es el caso de $\text{Bi}_2 \text{Sr}_2 \text{CaCu}_2 \text{O}_{8+\delta}$ [véase la figura 9].
178. ESTE MATERIAL tiene una temperatura crítica de 110 grados K, razonablemente alta;
179. SU INTERÉS proviene del éxito en la síntesis de una fibra mediante las técnicas empleadas para la fabricación de fibra óptica.
180. Se abre ASÍ un prometedor camino en la producción de materiales con textura favorable para el soporte de altas corrientes.

PÁRRAFO 39

181. En el marco de la teoría BCS (J. Baarden, L.N. Cooper y J.R Schrieffer) se sabe

que LA SUPERCONDUCTIVIDAD CONVENCIONAL resulta de la formación de pares de electrones (pares de Cooper) mediante el acoplamiento de los electrones con las vibraciones de la red.

182. DE ESTA FORMA las cargas pueden moverse en el material sin impedimento y, por ello, EL MATERIAL SUPERCONDUCTOR carece de resistencia eléctrica.
183. La mayor parte de la fenomenología de LOS NUEVOS SUPERCONDUCTORES conocida hasta la fecha puede explicarse con la teoría BCS.
184. Se han invocado algunos de LOS MECANISMOS FÍSICOS MENCIONADOS EN EL ARTÍCULO -acoplamiento Jahn-Teller, rotura de la degeneración espinorial de las bandas- para explicar la formación de pares de Cooper, pero hoy en día todavía se desconoce el mecanismo que actúa en este caso y qué relación existe con la estructura básica de las perovskitas.

PÁRRAFO 40

A modo de conclusión

185. Considerar EN PRIMER LUGAR, de forma simplificada, los efectos de las interacciones más intensas en materiales y, posteriormente, «afinar» el modelo atendiendo a las interacciones secundarias es un método científico común que permite abordar problemas muy complejos de áreas aparentemente dispares e inducir, a partir de UNA EXTENSA FENOMENOLOGÍA, LOS MECANISMOS que lo producen.
186. A lo largo de este artículo se ha ilustrado ESTE MÉTODO considerando que la contribución de los octaedros BX_6 a la energía de formación de los compuestos es dominante.

187. CON ESTA HIPÓTESIS, las vibraciones de los propios octaedros, la interacción con los momentos magnéticos, la acción de grupos moleculares con grados de libertad interna o la presencia de electrones de conducción contribuirán a la energía dando una pequeña perturbación.

188. LA PÉRDIDA DE SIMETRÍA Y EL CAMBIO DE PROPIEDADES son consecuencia de la minimización de la energía total del material.

ANEXO 9

PROPIEDADES DE LOS MICROAGREGADOS METÁLICOS

0. PEQUEÑOS AGREGADOS FORMADOS POR UNAS POCAS DECENAS O ESCASOS CIENTOS DE ÁTOMOS DE ELEMENTOS METÁLICOS presentan propiedades que difieren bastante del metal macroscópico.

PÁRRAFO 1

1. LAS MICROPARTÍCULAS METÁLICAS son agregados de unos pocos átomos que, debido a su pequeño tamaño, presentan PROPIEDADES DIFERENTES de las del correspondiente metal en el estado sólido usual.
2. Se LES llama también microagregados.
3. Mediante el estudio de LAS MICROPARTÍCULAS se sigue el crecimiento de la materia desde la fase gaseosa hasta la fase cristalina sólida.
4. ANTE ESE NUEVO FENÓMENO, los físicos se plantean cuestiones del siguiente tenor:
5. ¿CUÁNTOS ÁTOMOS deben contener LOS MICROAGREGADOS para que presenten conductividad metálica?
6. ¿Qué variaciones experimentan LA ESTRUCTURA ATÓMICA, EL PUNTO DE FUSIÓN Y OTRAS PROPIEDADES con el tamaño?.

PÁRRAFO 2

7. El intento de dar respuesta A ESAS PREGUNTAS FUNDAMENTALES ha impulsado el desarrollo de técnicas experimentales para la producción de MICROAGREGADOS.
8. Véase «Microagregados», por Michael A. Duncan y Dennis H. Rouvray, INVESTIGACION Y CIENCIA, febrero 1990].
9. POR OTRA PARTE, ESTOS OBJETOS, que pudieran parecer un tanto exóticos, revisten especial interés práctico en cuanto forman parte de aerosoles, coloides, catalizadores y otros.

PÁRRAFO 3

10. Desde el punto de vista experimental, para obtener resultados significativos, los tamaños de LOS MICROAGREGADOS deben ser suficientemente pequeños y hallarse bien definidos.
11. Dependiendo del tipo de experimento y las longitudes implicadas en el mismo, pueden requerirse TAMAÑOS DE SÓLO 1 NANÓMETRO (MILLONÉSIMA DE METRO);
12. POR LONGITUDES entendemos aquí, POR EJEMPLO, la longitud de onda de la radiación electromagnética que interacciona con el agregado, o bien la longitud de onda de los electrones de conducción, etcétera.

PÁRRAFO 4

13. El físico comienza SUS ENSAYOS con una suspensión coloidal.

14. Para preparar SUSPENSIONES COLOIDALES se parte de una disolución de iones metálicos (átomos dotados de carga por pérdida, o adición, de algún electrón externo), a la que se añade un agente reductor por ejemplo, hidrógeno atómico) cuya misión consiste en producir una disolución supersaturada de átomos metálicos en la que ocurre la condensación.
15. Escogiendo convenientemente LA CONCENTRACIÓN, TEMPERATURA Y AGENTE REDUCTOR, pueden obtenerse microagregados de dimensiones bien definidas e inferiores a los 10 nanómetros.
16. ESTE MÉTODO DE PREPARACIÓN ha permitido, POR EJEMPLO, estudiar las propiedades magnéticas de MICROAGREGADOS DE PLATINO DE DOS NANÓMETROS, O DE MICROAGREGADOS SUPERCONDUCTORES DE MERCURIO.

PÁRRAFO 5

17. UNA FORMA VERSÁTIL DE PREPARAR MUESTRAS DE MICROAGREGADOS es por condensación de un vapor metálico sobre un sustrato;
18. ÉSTE puede ser un óxido metálico, o bien un cristal de cloruro de sodio.
19. Escogiendo convenientemente EL RITMO DE EVAPORACIÓN, EL PLANO CRISTALINO DE LA SUPERFICIE DEL SUSTRATO DONDE EL VAPOR HA DE ADHERIRSE Y OTROS PARÁMETROS se consiguen láminas delgadas que contienen microagregados metálicos.
20. Una vez lograda ESA REUNIÓN DE ÁTOMOS, se procede a estabilizarla contra la reevaporación y la coalescencia, fenómeno éste por el que los microagregados crecen a expensas de los choques mutuos.

21. LA ESTABILIZACIÓN se alcanza manteniendo el sustrato a bajas temperaturas o recubriendo la película superficial con una capa de carbón.
22. Con tiempos de DEPOSICIÓN de unos 100 segundos en ultra alto vacío, los microagregados de oro formados en SUSTRATOS DE CLORURO de sodio presentan tamaños de alrededor de 10 nanómetro.

PÁRRAFO 6

23. EL MÉTODO DE PRODUCIR MICROAGREGADOS POR EVAPORACIÓN DEL METAL en una atmósfera gaseosa data de los años treinta;
24. ENTONCES se obtuvieron ya MICROAGREGADOS DE ORO, PLATA Y OTROS METALES EN AIRE a una presión de 1 torr.
25. (ESTA UNIDAD DE PRESIÓN, que indica la que soportaría un milímetro de mercurio, equivale a 133, 322 newton por metro cuadrado.)
26. El aspecto brillante usual, metálico, se pierde EN ESTAS CONDICIONES;
27. los microagregados presentan, PUES, UN ASPECTO MUY OSCURO.
28. Débese ESE FENÓMENO a la absorción resonante de radiación en el rango visible del espectro, para el cual las longitudes de onda son mayores que los diámetros de LOS MICROAGREGADOS.
29. POR DICHA RAZÓN, las superficies cubiertas con ESTE TIPO DE MICROAGREGADOS pueden emplearse como absorbentes efectivos en las aplicaciones de conversión fototérmica de la energía solar; por ejemplo, en los paneles.

PÁRRAFO 7

30. Para comprender el procesos de la formación de MICROAGREGADOS en el gas, pensemos que los átomos que escapan de la fuente de evaporación pierden energía cinética a través de las colisiones que sufren con los átomos del gas ambiente.
31. En un vacío convencional de 10^{-5} , torr, LOS ÁTOMOS DEL VAPOR METÁLICO tendrían un recorrido libre medio tan grande, que podrían alcanzar un sustrato sitio a 10 centímetros de distancia sin apenas haber sufrido colisiones.
32. AHORA BIEN, A UNA PRESIÓN DEL GAS DE 1 TORR, EL RECORRIDO LIBRE MEDIO disminuye hasta 50.000 nanómetros.
33. Debido al buen contacto térmico ENTRE EL GAS AMBIENTE Y LAS PAREDES CIRCUNDANTES MÁS FRÍAS, se origina un gradiente térmico muy cerca de la fuente de evaporación.
34. Si ESTE GRADIENTE adquiere intensidad suficiente, se crea una región donde la densidad del vapor metálico es superior a la densidad de saturación y se produce allí la nucleación de microagregados.

PÁRRAFO 8

35. LA NUCLEACIÓN constituye la fase inicial del proceso de crecimiento, en la cual los microagregados crecen remontando una barrera energética hasta formar núcleos de un tamaño crítico, a partir del cual es fácil continuar creciendo.
36. ESTOS MICROAGREGADOS van creciendo posteriormente por adición de nuevos átomos del vapor y por colisiones entre ellos.

PÁRRAFO 9

37. La irradiación del fluoruro de litio con neutrones ocasiona defectos en LA RED CRISTALINA, amén de átomos de litio INTERSTICIALES, es decir, alojados en sitios distintos de los nudos de la red.
38. LOS ÁTOMOS DE LITIO tienden a coagularse cuando la dosis es superior a 3×10^{21} neutrones por metro cuadrado.

PÁRRAFO 10

39. Se han realizado MUCHOS EXPERIMENTOS en vidrios porosos que contienen metales en sus poros.
40. LOS VIDRIOS POROSOS suelen contener un 96 % del dióxido de silicio, un tres por ciento de trióxido de boro y pequeñas cantidades de óxido de sodio, trióxido de aluminio y otros óxidos.
41. EL DIÁMETRO DE LOS POROS se cifra en unos 30 nanómetros.
42. Cuando EL VIDRIO AGUJERADO se sumerge en un baño de metal fundido a la presión de 7000 torr, el metal se ve forzado a penetrar en el interior de los poros.
43. Hay MUCHOS CRISTALES INORGÁNICOS QUE CONTIENEN CAVIDADES REGULARES, las cuales forman redes o canales paralelos.
44. LAS CAVIDADES DE LAS ZEOLITAS tienen tamaños entre 0,2 y 1,2 nanómetros, de manera que en alguna de ellas pueden acomodarse microagregados de sólo unos cuantos átomos.

45. ESTE TIPO DE MATERIALES se utiliza como catalizadores.
46. ASÍ, EL CATALIZADOR COMERCIAL DE FISCHER-TROPSCH está compuesto de microagregados de metales de transición (el hierro, por ejemplo), atrapados en los poros de minerales de sílice o zeolitas.
47. En la última década, debido a la crisis energética, ESTE CATALIZADOR ha despertado mucho interés por emplearse para la obtención de hidrocarburos a partir de monóxido de carbono e hidrógeno molecular.
48. Como es bien conocido, las superficies metálicas son químicamente muy reactivas y se han venido empleando como CATALIZADORES INDUSTRIALES.
49. Si EL METAL se pulveriza, se incrementa la superficie expuesta por unidad de masa de metal, esto es, aumenta su grado de dispersión, consiguiéndose de ese modo un mejor aprovechamiento de sus propiedades catalíticas.
50. Para tener UNA DISPERSIÓN SUPERIOR AL 50 POR CIENTO necesitamos dividir EL METAL hasta tamaños inferiores a los dos nanómetros.
51. CON ESTE DIÁMETRO, un microagregado de níquel contendría 400 átomos, 300 si se trata de paladio y 200 para el caso de platino.

PÁRRAFO 11

52. Se está ahora investigando la variación de la actividad y la selectividad catalíticas en función del tamaño de LOS MICROAGREGADOS METÁLICOS.
53. EN ESE DOMINIO importa conocer la estructura electrónica del MICROAGREGADO Y SU estructura geométrica, puesto que esta última determina la distribución

de átomos en su superficie, que son los que desempeñan el papel principal en el fenómeno de la catálisis.

54. Para descubrir LAS GEOMETRÍAS SUBYACENTES EN LOS MICROAGREGADOS se utiliza el microscopio electrónico, con el que se obtienen microfotografías de agregados de un solo nanómetro.

55. (El desarrollo del MICROSCOPIO DE EFECTO TÚNEL, dotado de UN MAYOR PODER DE RESOLUCIÓN, permitirá estudiar GEOMETRÍAS DE TAMAÑOS INFERIORES.

56. La primera aplicación de ESTA TÉCNICA al campo de los microagregados fue realizada en 1987 por Arturo Baró y sus colaboradores en la Universidad Autónoma de Madrid.)

57. EN MICROSCOPIA ELECTRÓNICA, LOS MICROAGREGADOS A INVESTIGAR se forman sobre delgadas películas de un material soporte, constituyendo una de las dificultades del análisis de la imagen el enmascaramiento debido a defectos en el soporte cristalino o a la naturaleza amorfa o policristalina del sustrato empleado.

PÁRRAFO 12

58. Algunas de las formas observadas en MICROGRAFÍAS son similares a las que adoptan los cristales macroscópicos ordinarios.

59. ELLO no es extraño, si pensamos que, en condiciones de equilibrio, la disposición de los átomos superficiales, causante de la forma externa, viene determinada por la condición de mínima energía superficial.

60. ASÍ, para la estructura cristalina cúbica centrada en las caras (ccc), común para muchos metales, ESTA CONDICIÓN favorece las formas externas octaédricas.
61. Si A UN OCTAEDRO le truncamos cuatro o seis de sus vértices, LO convertimos, respectivamente, en un dodecaedro o un cuboctaedro.
62. ESTAS FORMAS OCTAÉDRICAS se han observado en microagregados de platino con soportes de grafito, conjunto interesante como catalizador en la producción de gas metano que se realiza al calentar el sistema de 800°C en una atmósfera reductora, de hidrógeno molecular, siendo la fuente de carbono el propio sustrato de grafito.

PÁRRAFO 13

63. Por medio de la microscopía electrónica se puede obtener diagramas de difracción de LOS DISTINTOS MICROAGREGADOS;
64. se descubre a veces que METALES que cristalizan en cierto sistema geométrico, lo hacen en otro diferente cuando sus dimensiones son MICROSCÓPICAS.
65. ALGUNOS MICROAGREGADOS DE ORO, evaporados sobre un sustrato de cloruro de sodio, presentan también ESTRUCTURAS GEOMÉTRICAS diferentes de las de los cristales macroscópicos de oro metálico (ccc).
66. Se han observado, EN PARTICULAR, MORFOLOGÍAS ICOSAÉDRICAS que no pueden deducirse de ninguna estructura cristalina.
67. EN LAS ESTRUCTURAS CRISTALINAS, la periodicidad o simetría de traslación, implica que sólo son compatibles con ella ejes de simetría de órdenes 1,2, 3, 4 ó 6, mientras que EL ICOSAEDRO tiene ejes de simetría de orden 5.

68. (En cristalografía, UN EJE DE SIMETRÍA DE ORDEN N indica que una rotación de $2\pi/n$ radianes del cristal alrededor de un eje que pasa a través de un nudo de la red cristalina transforma ésta en sí misma.

PÁRRAFO 13

69. Desde un punto de vista teórico se han hecho muchos esfuerzos para predecir la estructura energéticamente más favorable de MICROAGREGADOS PEQUEÑOS.
70. La estabilidad de LOS MICROAGREGADOS ICOSAÉDRICOS por debajo del rango de los 100 o 200 átomos puede interpretarse como debida a un efecto de enlace entre los vecinos más inmediatos de un átomo.

PÁRRAFO 14

71. Consideraciones geométricas simples muestran, POR EJEMPLO, que, PARA 13 ÁTOMOS, EL POLIEDRO con mayor coordinación (mayor número de vecinos) correspondiente a la red cúbica centrada en las caras consiste en 12 átomos superficiales más un átomo central.
72. Una pequeña distorsión de ESTE POLIEDRO lo transforma en un icosaedro, aumentando el número de coordinación de los átomos superficiales de 5 a 6.
73. POR TANTO, en un modelo simple con fuerzas atractivas entre primeros vecinos, EL ICOSAEDRO, con sus ejes de simetría de orden 5, puede hacer de núcleo para microagregados mayores de simetría similar.

74. DE HECHO hay una secuencia de MICROAGREGADOS DE FORMAS ICOSAÉDRICAS PERFECTAS QUE CONTIENEN 13, 55, 147 Y MÁS ÁTOMOS, y que se observan sin dificultad en el caso de gases nobles (argón, kriptón, etcétera).

PÁRRAFO 15

75. En general, las teorías vigentes sitúan en el nanómetro el tamaño aproximado por debajo del cual LAS ORDENACIONES ATÓMICAS difieren de las de fase sólida.

76. Hoy se recurre a una técnica de absorción de rayos X que emplea radiación de sincrotrón, especialmente eficaz para estudiar LAS ESTRUCTURAS QUE FORMAN LOS MICROAGREGADOS:

77. SE DENOMINA EXAFS (siglas de «Extended X-Ray Absorption Fine Structure»).

78. CON ELLA se obtiene el espectro que resulta de las oscilaciones en la sección eficaz del fotoelectrón debido a los procesos de dispersión que éste (arrancado del átomo por los rayos X) sufre por los átomos que rodean al átomo emisor.

79. ESTA TÉCNICA no requiere que el orden atómico sea de largo alcance, como ocurre en las técnicas de difracción, y da información sobre pequeñísimas regiones alrededor de cada átomo.

80. MEDIANTE EL MÉTODO DE EXAFS han podido observarse contracciones del 2,5 por ciento, en el parámetro de la red de microagregados de oro con un nanómetro de diámetro, respecto de la fase sólida.

81. Según las leyes termodinámicas, cabe esperar ESTA CONTRACCIÓN EN MICROAGREGADOS debido a la tensión superficial, aunque podríamos preguntarnos si también LOS MICROAGREGADOS siguen las leyes de la termodinámica macroscópica.

PÁRRAFO 16

82. Consideremos ahora la estructura electrónica de LOS MICROAGREGADOS.
83. Del familiar modelo de ELECTRONES LIBRES resulta que, en un metal, a tenor de las reglas de la mecánica cuántica, los niveles de energía de los electrones están tan juntos que se puede hablar de una función continua que representa la distribución de los electrones en sus diferentes estados de energía, prácticamente insensible a la presencia de la superficie del metal.

PÁRRAFO 17

84. Cuando tratamos con microagregados, hemos de modificar drásticamente ESTA IMAGEN SIMPLE DE LOS ELECTRONES METÁLICOS.
85. La extensión finita va a provocar una discretización de LOS NIVELES DE ENERGÍA, que sentirán el efecto de la superficie a través de las condiciones de contorno que ha de satisfacer la función de onda del electrón.
86. A la temperatura del cero absoluto, LOS NIVELES ELECTRÓNICOS están llenos hasta el denominado nivel de energía de Fermi;
87. LOS SUPERIORES se encuentran desocupados.
88. Si N es el número de electrones libres del microagregado, el intervalo δ entre SUS NIVELES DE ENERGÍA será del orden dado por la razón de energía de Fermi.
89. Y si consideramos que LA ENERGÍA DE FERMI se cifra en varios electron-volt para los metales, tendremos que, para partículas de un diámetro de 5 nanómetros, el valor del intervalo será de unos 10^{-4} electronvolt.

PÁRRAFO 17

90. Respecto a las propiedades de METALES MICROSCÓPICOS, δ es menor que cualquier cantidad de energía significativa, pues ese intervalo disminuye con N.
91. No OTRA COSA quiere indicar que LOS NIVELES forman un espectro casi continuo.
92. AHORA BIEN, a bajas temperaturas, T, tales que δ sea comparable con LA ENERGÍA DE AGITACIÓN TÉRMICA a la temperatura T, o con débiles campos magnéticos H, tales que δ sea comparable con la magnitud del desdoblamiento de LOS NIVELES ELECTRÓNICOS inducido por H, tendremos que la capacidad calorífica o la susceptibilidad magnética del agregado difieren bastante de las del metal.
93. (LA ENERGÍA DE AGITACIÓN TÉRMICA A LA TEMPERATURA T es del orden de $0,86 \times 10^{-4}$ electronvolt.)

PÁRRAFO 18

94. Las mediciones por resonancia magnética nuclear (RMN) han aportado pruebas de la existencia de ESTOS EFECTOS DE CUANTIFICACIÓN.
95. Durante más de veinte años se ha intentado demostrar experimentalmente LA CUANTIZACIÓN DE LOS NIVELES con métodos ópticos usando las frecuencias del infrarrojo lejano, que son comparables con los intervalos entre los niveles electrónicos adyacentes.
96. SIN EMBARGO, debido a que los microagregados de las muestras no alcanzan EL MISMO TAMAÑO, en vez de ofrecer UNAS SEPARACIONES ENTRE

NIVELES BIEN DEFINIDAS, se tiene una distribución estadística de ellas que puede llegar enmascarar los resultados esperados.

97. EL PROPIO SOPORTE DE LOS MICROAGREGADOS altera TAMBIÉN sus propiedades ópticas.

98. ELLO explica que no se haya conseguido todavía demostrar, con ESTOS MÉTODOS, la estructura de niveles.

PÁRRAFO 19

99. Una nueva manera de producir MICROAGREGADOS LIBRES, SIN SOPORTE DE NINGÚN MATERIAL, abre interesantísimas vías a la exploración de sus propiedades fundamentales.

100. Nos estamos refiriendo a MICROAGREGADOS PRODUCIDOS EN CHORROS SUPERSÓNICOS.

101. Desde hace tiempo se sabe que LA EXPANSIÓN ADIABÁTICA DE UN GAS O VAPOR EN VACÍO enfría rápidamente el gas y puede resultar en un vapor sobresaturado.

102. Si EL GAS contiene átomos extraños, no tardará en desarrollarse la condensación en tales núcleos y en formarse una dispersión de pequeñas gotas o microcristales del gas en expansión.

103. AHORA BIEN, en el proceso de nucleación homogénea, que es el que importa AQUÍ, LOS NÚCLEOS que se originan son microagregados de los mismos constituyentes del gas, y así se produce la condensación en gases puros que se encuentran suficientemente sobresaturados.

PÁRRAFO 20

104. LOS FENÓMENOS DE NUCLEACIÓN-CONDENSACIÓN han constituido permanente contratiempo para los ingenieros y operadores de turbinas de vapor, y una bendición para fabricantes de materiales finamente dispersados.
105. En la escala de la atmósfera terrestre DAN CUENTA de la lluvia, nieve, granizo y niebla.
106. En el marco del universo, LA NUCLEACIÓN-CONDENSACIÓN fue responsable de la formación de la materia condensada en sus diferentes configuraciones y tamaños.
107. Hasta hace unos treinta años, la escala temporal de la mayoría de las expansiones gaseosas adiabáticas era muy grande en comparación con la escala temporal de la cinética molecular del PROCESO DE NUCLEACIÓN-CONDENSACIÓN.
108. Y, ASÍ, las etapas más tempranas observables del PROCESO eran ya tardías, pues la nueva fase había crecido hasta tamaños macroscópicos.

PÁRRAFO 21

109. En 1956, Erwin Becker y Wolfgang Henkes, de la Universidad de Marburg, se dieron cuenta de que LA CONDENSACIÓN era un fenómeno con el que había que contar en haces supersónicos que se expandieran al vacío a través de pequeñísimos orificios.
110. Se puede decir que ESTOS INVESTIGADORES realizaron el primer experimento sobre formación de microagregados.

111. En 1961 se inició una nueva era en LA INVESTIGACIÓN DE MICROAGREGADOS cuando EL MISMO HENKES daba a conocer la detección, por medio de espectrometría de masas, de dímeros moleculares en haces libres de dióxido de carbono.
112. Todavía en 1977, ALGUNOS CIENTÍFICOS mantenían que LOS MICROAGREGADOS AISLADOS EN VACÍO eran un delirio teórico.
113. PERO en los últimos años MUCHOS GRUPOS DE INVESTIGACIÓN han trabajado activamente y hoy pueden producirse, y analizarse, MICROAGREGADOS CUYOS TAMAÑOS VAN DESDE EL DÍMERO HASTA MILES DE MOLÉCULAS.

PÁRRAFO 22

114. Para producir CHORROS SUPERSÓNICOS METÁLICOS, se comienza por vaporizar el metal en un horno a alta temperatura mediante láseres pulsantes de alta potencia.
115. EN ESTE ÚLTIMO CASO se obtiene, en vez de UN CHORRO CONTINUO, un chorro pulsante.
116. A LOS VAPORES METÁLICOS se les obliga a pasar por un pequeño orificio, de unos 50.000 nanómetros, en el que por choque se producen los microagregados.
117. A LA SALIDA SE EXPANDEN en alto vacío para formar el chorro supersónico.
118. Habida cuenta de la parvedad de las dimensiones de TALES CHORROS, la escala temporal de la expansión es del mismo orden que la escala temporal del proceso de nucleación-condensación.

119. EL RESULTADO NETO es que las primeras etapas de ESOS PROCESOS pueden resolverse y analizarse.

PÁRRAFO 23

120. Si EL VAPOR METÁLICO se expande conjuntamente con un gas noble, los microagregados crecen con mayor facilidad, obteniéndose tamaños superiores.

121. Para identificar LOS MICROAGREGADOS se recurre al espectrómetro de masas;

122. a la detección en EL ESPECTRÓMETRO precede la ionización de LOS MICROAGREGADOS del haz mediante bombardeo con electrones de determinada energía o por absorción de radiación electromagnética.

PÁRRAFO 24

123. EN EL ESPECTRÓMETRO DE TIEMPO DE VUELO, EL HAZ DE MICROAGREGADOS IONIZADOS curva su trayectoria al paso entre dos placas metálicas, entre las que se aplican pulsos de voltaje, de una millonésima de segundo de duración a intervalos de milisegundos.

124. EL HAZ avanza entre uno y dos metros hasta llegar al detector, que traduce el impacto de cada microagregado ionizado en un pulso eléctrico que debe amplificarse.

125. El intervalo temporal que media entre EL PULSO DE VOLTAJE EN LAS PLACAS Y EL PULSO ENTREGADO POR EL DETECTOR mide el tiempo de vuelo de cada ion, tiempo que guarda relación con su masa, con la longitud recorrida, con el potencial de aceleración y con la carga del ion considerado.

126. Un analizador multicanal registra en su memoria EL NÚMERO DE PULSOS REGISTRADOS DURANTE DETERMINADO INTERVALO para valores diferentes de tiempo de vuelo, o, lo que es equivalente, de la masa de los microagregados.

PÁRRAFO 25

127. ASÍ se obtiene el espectro de masas de LOS MICROAGREGADOS IONIZADOS.

128. EL ESPECTRO está formado por picos cuya altura es proporcional al número de microagregados de masa m detectados durante cierto intervalo temporal.

129. Hay MICROAGREGADOS de determinados tamaños que se destacan por su particular abundancia, o, dicho de una manera más precisa, la tasa de conteo muestra un bajón brusco después de esos tamaños, lo cual significa que, para cierto número de átomos, los microagregados son más estables que para otros.

130. ESOS MICROAGREGADOS DE ESTABILIDAD PRIVILEGIADA poseen «números mágicos» de átomos, así llamados por su analogía con los números mágicos «de los núcleos atómicos».

131. EN MICROAGREGADOS DE SODIO, así como de otros elementos alcalinos, ESTOS NÚMEROS MÁGICOS son 2, 8, 20, 40 58 y 92, y pueden ser interpretados mediante una sencilla teoría electrónica.

132. Pensemos, POR EJEMPLO, que CADA ÁTOMO DE SODIO posee un electrón de valencia, es decir, un electrón que va a participar en el enlace metálico.

133. EN CONSECUENCIA, los microagregados con número mágico de átomos poseerán 2,8, 20, 40 y 92 ELECTRONES.

PÁRRAFO 26

134. **¿Dónde TIENEN SU origen?**

135. Con cierta ingenuidad podemos imaginar que EL MICROAGREGADO es esférico, con sus electrones de valencia atrapados en un pozo de potencial dotado de simetría esférica.

136. ENTONCES, los niveles de energía de LOS ELECTRONES vienen caracterizados por el número cuántico/asociado al momento angular orbital.

137. Para cada valor de l , EL MOMENTO ANGULAR puede tener $2l + 1$ orientaciones diferentes, siendo la energía del electrón igual para todas ellas, debido a la simetría esférica del pozo.

138. POR OTRA PARTE, EL ESPÍN DEL ELECTRÓN puede tener DOS ORIENTACIONES DISTINTAS (arriba y abajo).

139. EN CONSECUENCIA, resultan $2(2l+1)$ ESTADOS CUÁNTICOS con idéntica energía para cada valor de l .

PÁRRAFO 27

140. Para que LA ENERGÍA DEL ESTADO quede completamente caracterizada, tenemos que conocer, APARTE DEL VALOR DE l , otro número cuántico, n , que se denomina número cuántico principal y tal que $n-1$ sea el número de nodos de la función de onda del electrón.

141. (LOS NODOS son los valores de la distancia al centro del pozo en los que la función de onda cambia de positiva a negativa o viceversa.)

142. Ordenando LOS NIVELES CUÁNTICOS según sus energías, esto es, de electrones más ligados a electrones menos ligados, puede verse que, en el nivel más bajo ($n=1, l=0$), caben dos electrones, seis en el siguiente ($n=1, l=1$), diez en el siguiente ($n=2, l=0$) y así sucesivamente.
143. LA CONSIGUIENTE OCUPACIÓN DE CAPAS ELECTRÓNICAS se ajusta a los números mágicos observados en microagregados de sodio y de otros elementos alcalinos por Walter Knight y colaboradores, de la Universidad de California en Berkeley.
144. La pérdida de estabilidad que se observa, EN EL EJEMPLO DEL SODIO, inmediatamente después de cada NÚMERO MÁGICO se debe al salto en la energía para empezar a ocupar LA CAPA ELECTRÓNICA INMEDIATA SUPERIOR.

PÁRRAFO 28

145. LOS ELEMENTOS ALCALINOS COMO SODIO O POTASIO tienen UNA ESTRUCTURA ELECTRÓNICA MUY SENCILLA y en el estado metálico se adaptan perfectamente al modelo de electrones libres.
146. MÁS CURIOSO resulta el que científicos de la Universidad de Osaka hayan observado LOS MISMOS NÚMEROS MÁGICOS en microagregados de los metales nobles cobre, plata y oro.
147. ESTOS tienen también un electrón externo que participa en el enlace, pero el corazón iónico no es tan inerte como en los elementos alcalinos;
148. DE HECHO, los electrones de tipo d DEL CORAZÓN IÓNICO contribuyen al enlace en los metales nobles.

149. Es, POR TANTO, notable que pequeños agregados de COBRE, PLATA Y ORO se comporten como alcalinos y que LOS ELECTRONES D DEL CORAZÓN IÓNICO no ejerzan ninguna influencia en las variaciones de la población de agregados.

PÁRRAFO 29

150. IDEAS SIMILARES, basadas en un modelo de capas, se han usado para explicar los números mágicos observados en aluminio y cinc y cadmio.

151. Evidentemente, EN ESTOS CASOS el número de electrones de valencia con que cada átomo contribuye es más de uno;

152. CON ELLO, para obtener LOS NÚMERO MÁGICOS DE ELECTRONES 8, 20, 34, 40, 58 Y 92 CITADOS ANTERIORMENTE, basta, en el caso de átomos divalentes, con la mitad de átomos: 4, 10, 17, 20, 29 y 46.

153. La naturaleza electrónica de ESTOS NÚMEROS MÁGICOS es algo sorprendente.

154. ¿Es que no SE MANIFIESTA la estructura geométrica del microagregado?

155. En nuestro grupo se ha trabajado bastante para aclarar ESTA CUESTIÓN.

156. COMO POSIBLE EXPLICACIÓN hemos sugerido que la temperatura de los microagregados formados en expansiones supersónicas es alta y sus átomos se hallan en movimiento, no disponiéndose en estructuras geométricas bien definidas.

157. La difícil determinación de la temperatura interna del agregado impide ofrecer todavía una respuesta concluyente A ESTAS PREGUNTAS, aunque experimentos realizados por Ernest Schumacher en la Universidad de Berna apoyan nuestra interpretación.
158. Para ser MÁS CLAROS los números mágicos de MICROAGREGADOS «FRÍOS» no coinciden del todo con los microagregados «calientes».
159. En cualquier caso, sí que SE PUEDE DECIR QUE los espectros de masas de PARTÍCULAS «CALIENTES» de metales sencillos reflejan la naturaleza discreta de los niveles electrónicos, tan buscada años atrás.

PÁRRAFO 30

160. Para OTROS METALES, como el bario, se encuentran números mágicos sin nada que ver con el número de electrones;
161. OBEDECEN, POR CONTRA, a motivos geométricos.
162. EN SU ESPECTRO DE MASAS hay picos intensos correspondientes a la secuencia de números mágicos 13, 19, 23, 26, 29 y 32.
163. ESTOS NÚMEROS se explican del siguiente modo.
164. El microagregado de 13 ÁTOMOS es un icosaedro con un átomo en el centro.
165. Hagamos ahora crecer EL MICROAGREGADO añadiendo UN ÁTOMO encima de cada una de las cinco caras que rodean a uno de los vértices del ICOSAE-DRO y, por último, otro átomo encima del propio vértice.

166. EL ICOSAEDRO CON ESTA CAPUCHA tiene 19 átomos;
167. la formación de LA CAPUCHA maximiza el número de enlaces.
168. LA FORMACIÓN POSTERIOR DE CAPUCHAS ADYACENTES A LA PRIMERA da lugar a la secuencia de números mágicos escrita arriba.

PÁRRAFO 31

169. El interés de ESTOS RESULTADOS yace en que dan información sobre el tipo de enlace químico entre los átomos del microagregado.
170. EL ÁTOMO DE BARIO presenta una estructura electrónica de capas completas.
171. POR OTRO LADO, la secuencia de números mágicos del BARIO coincide con la observada en los mejores aislantes, que son los gases nobles: argón, kriptón, etcétera.
172. PEQUEÑOS AGREGADOS DE BARIO parecen ser, POR TANTO, AISLANTES, aunque a medida que el tamaño del microagregado aumenta, en algún momento se producirá la transición al estado metálico.
173. Los números mágicos de PARTÍCULAS DE ANTIMONIO son múltiplos de cuatro y se explican mediante estructuras formadas por tetraedros.
174. Las estabilidades de PARTÍCULAS DE SILICIO Y GERMANIO también se relacionan con ESTRUCTURAS GEOMÉTRICAS.

PÁRRAFO 32

175. Hemos visto que en los espectros de masas se detectan MICROAGREGADOS ionizados.
176. Cabe preguntarse, PUES, si EL PROCESO DE IONIZACIÓN alterará la distribución de tamaños de LOS MICROAGREGADOS NEUTROS.
177. ESTE es un campo de activa investigación.
178. POR UNA PARTE, EL PROPIO PROCESO DE IONIZACIÓN puede fragmentar EL MICROAGREGADO en dos más pequeños.
179. POR OTRA, cuando UN MICROAGREGADO SE IONIZA, queda en él un exceso de energía electrostática, cuya cuantía depende, directamente, del número de electrones arrancados en el proceso de ionización e, inversamente, del tamaño del microagregado.

PÁRRAFO 33

180. El fenómeno de la explosión coulombiana consiste EN LA RUPTURA DEL MICROAGREGADO EN FRAGMENTOS debido a que la repulsión electrostática entre los defectos de carga (o cargas positivas efectivas) creados por LA IONIZACIÓN es tal que no puede contrarrestarse por las fuerzas de enlace entre los átomos del microagregado.
181. Cuanto mayor es la energía del ELECTRÓN IONIZANTE, mayor es EL GRADO DE IONIZACIÓN DE LOS MICROAGREGADOS.

PÁRRAFO 34

182. En algunos casos EL GRADO DE IONIZACIÓN no parece interferir con los números mágicos de abundancia.
183. POR EJEMPLO, se ha observado EN MICROAGREGADOS DE BARIO DOBLE Y TRIPLEMENTE IONIZADOS LA MISMA SECUENCIA DE NÚMEROS MÁGICOS COMENTADA ANTES para microagregados de bario neutros.
184. Eso sí, no SE HAN OBSERVADO MICROAGREGADOS DOBLEMENTE CARGADOS (B_{aN}^{++}) menos de 22 átomos, hecho que se debe, evidentemente, al fenómeno de la explosión coulombiana.
185. EN OTROS CASOS, MÁS COMPLICADOS DE EXPLICAR, los números mágicos de microagregados neutros y cargados difieren a veces en algunos detalles.
186. ESTO ocurre, POR EJEMPLO, con el plomo.

PÁRRAFO 35

187. EL PROCESO DE LA EXPLOSIÓN COULOMBIANA también se está empezando a usar para investigar la geometría de microagregados muy pequeños.
188. EL FUNDAMENTO FÍSICO es el siguiente:
189. si conseguimos «desnudar» a los átomos de UN PEQUEÑO AGREGADO de sus electrones externos, el esqueleto iónico resultante explotará en virtud de LA REPULSIÓN COULOMBIANA entre los iones.

190. Como LAS FUERZAS COULOMBIANAS dependen sólo de distancias entre las cargas que se repelen y de la magnitud de éstas, los fragmentos que se detectan dibujarán una imagen tridimensional ampliada de la geometría original del microagregado.

PÁRRAFO 36

191. En chorros supersónicos se pueden medir potenciales de ionización de LOS MICROAGREGADOS, es decir, la mínima energía necesaria para arrancarles un electrón.

192. Se emplean haces de fotones de energía variable para IONIZARLOS y establecer la mínima energía del fotón por la cual comienzan a registrarse impulsos en el canal del conjunto detector-analizador correspondiente a cada tamaño.

193. EL POTENCIAL DE IONIZACIÓN DE MICROAGREGADOS DE SODIO entre 1 y 65 átomos disminuye al aumentar el tamaño, en forma similar al trabajo necesario para arrancar un electrón de una esfera conductora.

194. Superpuesto a ESTE COMPORTAMIENTO hay, NO OBSTANTE, oscilaciones y saltos bruscos que reflejan la estructura de capas que adoptan los electrones en ESTOS MICROAGREGADOS.

195. EN MICROAGREGADOS DE HIERRO DE 1 A 25 ÁTOMOS, el potencial de ionización disminuye bruscamente con el tamaño, disminución que se acompaña de oscilaciones mucho más fuertes que en el sodio.

196. Las propiedades catalíticas de LOS MICROAGREGADOS dependen del POTENCIAL DE IONIZACIÓN, que es una medida de su reactividad.

PÁRRAFO 37

197. OTRA CONSECUENCIA DE LA NATURALEZA DISCRETA DE LOS NIVELES ELECTRÓNICOS EN LOS MICROAGREGADOS es el efecto impar, según el cual los microagregados con un número par de electrones se muestran más estables que los dotados de un número impar y suelen tener un potencial de ionización algo mayor.

198. ELLO se debe a que EL ESPÍN DEL ELECTRÓN puede presentar dos orientaciones diferentes, de manera que, si el número de electrones es par, existe el mismo número de electrones con cada orientación de espín.

199. PERO queda mucho camino por andar si se compara con los dos límites entre los que se sitúan LOS MICROAGREGADOS: los átomos por un lado y la materia condensada por otro.

ANEXO 10

SINGULARIDADES EN RELATIVIDAD GENERAL

- 0.1. Existe la creencia generalizada de que LAS SINGULARIDADES espacio-temporales -tales como la gran explosión inicial- son consustanciales con la teoría de la relatividad general.
- 0.2. PERO no hay razones para sostener DICHA AFIRMACIÓN.

PÁRRAFO 1

1. Entre las muchas y diversas contribuciones revolucionarias y geniales de Albert Einstein (1879-1955) a la física se encuentra LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD GENERAL.
2. No se debe confundir a ÉSTA con la relatividad especial.
3. LA SEGUNDA no es más que una teoría en la que se relacionan diferentes observadores inerciales, mientras que LA PRIMERA es una teoría de la gravitación, o más precisamente de la interacción gravitatoria.
4. Conocemos CUATRO INTERACCIONES fundamentales, a saber, las nucleares débil y fuerte, la electromagnética y la gravitatoria.
5. Entre TODAS ELLAS, y con mucho, la gravitatoria es la más débil.
6. SIN EMBARGO, ESTO no LE otorga una categoría inferior todo lo contrario:

7. se trata de LA ÚNICA RELEVANTE para el estudio de fenómenos a gran escala, para fijar ideas a escalas planetarias o mayores.
8. La causa de LA PREVALENCIA DE LA FUERZA DE LA GRAVEDAD es que, POR UNA PARTE, las interacciones nucleares son de corto alcance -para tamaños del orden del núcleo atómico- y no revisten interés para fenómenos planetarios estelares o cosmológicos.
9. POR OTRA PARTE, aunque LA INTERACCIÓN ELECTROMAGNÉTICA es de alcance ilimitado, LAS PARTÍCULAS QUE CREAN EL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO pueden tener carga positiva o negativa;
10. El efecto que producen LAS UNAS es contrarrestado por el causado POR LAS OTRAS, al menos a gran escala, donde habrá más o menos, el mismo número de cargas positivas y negativas.
11. Queda, POR TANTO, la interacción gravitatoria:
12. además de ser de alcance ilimitado, se halla ÉSTA generada por las masas (en rigor, por la energía);
13. dado que sólo se conocen MASAS Y ENERGÍAS positivas, la gravedad es siempre atractiva, y en las ocasiones en las que existe una gran concentración de materia se convierte en la interacción cuyos efectos son dominantes.

PÁRRAFO 2

14. Como corolario evidente de LO ANTERIOR, podemos afirmar que la relatividad general (RG) es la teoría apropiada para el estudio de los fenómenos cosmológicos -evolución del universo-, astrofísico -estudio de galaxias, estrellas, etc. y planetarios -órbitas de los planetas en el sistema solar-.

15. Aunque la cosmología y la astrofísica usan TAMBIÉN OTRAS RAMAS DE LA FÍSICA, inevitablemente han de tomar como base la RG.
16. Las predicciones de LA RG EN TODOS ESTOS CAMPOS han sido útiles y, en ocasiones, han recibido una espectacular confirmación;
17. PERO lo que ni los más optimistas podían imaginarse era que SE PUDIERAN FORMULAR Y DEMOSTRAR los denominados teoremas de singularidades.
18. ESTOS TEOREMAS, desarrollados principalmente por Stephen W. Hawking, de la Universidad de Cambridge, Roger Penrose, de la Universidad de Oxford, predicen, bajo condiciones determinadas, la existencia de singularidades del espacio-tiempo, o sea, de la base de nuestro mundo clásico.

PÁRRAFO 3

19. DOS TIPOS DE SINGULARIDADES son muy famosos: la gran explosión o «big bang», en la cual se supone que se originó nuestro universo, y la que se produce en el interior de un agujero negro como resultado del colapso gravitatorio de estrellas de gran masa.
20. Hay UN TERCER TIPO DE SINGULARIDAD, menos conocido, de enorme interés: la que se produce cuando chocan dos ondas de gravedad y se destruyen mutuamente de forma catastrófica.
21. Más adelante hablaremos de TODAS ELLAS con cierto detalle.
22. PERO. ¿qué es UNA SINGULARIDAD?.
23. ESTA es una pregunta singularmente difícil de responder.

24. Aun cuando NUESTRA NOCIÓN INTUITIVA es muy clara, plasmar dicha noción en un enunciado riguroso en RG no resulta fácil.
25. Baste por el momento CON TALES APROXIMACIONES INTUITIVAS. PARA ELLO, nada mejor que recordar que el campo eléctrico creado por una carga aislada es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a la carga.
26. En su expresión matemática, ESE CAMPO equivale a uno partido por r al cuadrado ($1/r^2$), donde r es la distancia.
27. A medida que disminuye LA DISTANCIA, aumenta el valor del campo y, en el límite, cuando la distancia se anula ($r=0$) el campo se hace inconmensurablemente grande, o sea, infinito.
28. ESTA es una singularidad típica, y se pueden encontrar ejemplos similares en todos los campos de la física.
29. En cualquier caso, ESTA SINGULARIDAD podría calificarse de benigna, por las siguientes dos razones:
30. PRIMERO, es evidente que LA SINGULARIDAD indica la existencia de una fuente del campo -la carga que crea el campo-;
31. SEGUNDO, aunque EL CAMPO ELÉCTRICO se hace infinito, el resto de las magnitudes físicas no se ven afectadas por ello y, aún más importante, las bases fundamentales de toda la física, el espacio y el tiempo permanecen inalteradas.

PÁRRAFO 4

32. La situación en RG es radicalmente DIFERENTE, EN PARTICULAR EN LO CONCERNIENTE A LA SEGUNDA RAZÓN CITADA.

33. ELLO se debe a que, EN ESTA TEORÍA, el propio espacio-tiempo guarda íntima relación con el campo gravitatorio.
34. ASÍ cuando ESTE ÚLTIMO se hace infinito el propio espacio-tiempo deviene singular.
35. Hablando llanamente EL ESPACIO-TIEMPO queda destruido y, por consiguiente, todas las leyes de la física pierden su validez.
36. TAMAÑA CATÁSTROFE es, como se comprenderá, inaudita:
37. la propia física predice, a través de la RG, SU AUTODESTRUCCIÓN.
38. Para darnos buena cuenta de ELLO, nada mejor que un somero repaso de las nociones fundamentales de la RG.

Geometría y causalidad.

PÁRRAFO 5

39. CUALQUIER TEORÍA DE LA GRAVITACIÓN ha de incorporar, entre sus principios esenciales, la propiedad experimental de que todos los cuerpos caen con la misma aceleración en un campo gravitatorio dado.
40. Se atribuye a Galileo el acierto de haber reconocido ESTE IMPORTANTÍSIMO RESULTADO, según el cual la aceleración que alcanza un objeto grande y pesado digamos una persona- cuando es arrojado desde cierta altura es la misma que la que alcanza cualquier otro objeto -digamos una pluma de ave-, con independencia de su masa y de sus propiedades internas.

41. (SE HAN DESPRECIADO los efectos de resistencia y rozamiento del aire;
42. EL RESULTADO es riguroso en el vacío.)
43. La profunda comprensión de ESTE HECHO condujo a Einstein a enunciar el principio de equivalencia, soporte de su teoría de la RG y que establece la equivalencia local de un campo de gravedad con un sistema de referencia acelerado, no inercial.
44. UN SISTEMA DE REFERENCIA se describe mediante cantidades geométricas;
45. POR TANTO, a través de la equivalencia, un campo gravitatorio define LA GEOMETRÍA del espacio-tiempo.

PÁRRAFO 6

46. Es intuitivamente claro que LA EXPLICACIÓN GEOMÉTRICA DEL MOVIMIENTO DE LOS CUERPOS satisface la propiedad hallada por Galileo, pues éstos describen trayectorias siguiendo los caminos geométricos más favorables independientemente de su masa.
47. Imaginemos, POR EJEMPLO, que EL ESPACIO es una sábana que tenemos extendida y estirada en el aire.
48. Si lanzamos una canica, ésta se moverá POR LA SÁBANA según una línea recta.
49. Pongamos ahora un cuerpo pesado en el centro de LA SÁBANA.
50. ESTA se curva -¡su geometría cambia! y la canica describirá ahora trayectorias curvas.

51. Podemos incluso imaginar UN CUERPO TAN PESADO que rompe LA SÁBANA, un hecho ciertamente singular.
52. DE LA MISMA MANERA, la presencia de energía produce curvatura en el espacio-tiempo, y, por consiguiente, define la estructura geométrica de éste.
53. Una consecuencia directa de TODO LO DICHO es que la luz también es atraída por la gravedad, y los rayos luminosos siguen trayectorias curvas en un campo gravitatorio.
54. A LA LUZ le gusta ir por los caminos más descansados, y éstos son, por supuesto, los geodésicos definidos por la geometría espacio-temporal.
55. Históricamente, la comprobación experimental de la desviación de LOS RAYOS LUMINOSOS que pasan cerca del Sol, realizada por Arthur Stanley Eddington y colaboradores en 1919, dio el espaldarazo decisivo para la definitiva aceptación de la RG.
56. Como se sabe, la velocidad de LA LUZ en el vacío -aproximadamente 300.000 kilómetros por segundo - es la máxima velocidad de propagación de energía.
57. EN ESTE SENTIDO, LA LUZ nos proporciona la estructura causal de nuestro mundo.
58. La velocidad de LA LUZ nos ofrece información sobre qué sucesos guardan MUTUA RELACIÓN CAUSAL.
59. (Se dice que DOS SUCESOS GUARDAN RELACIÓN CAUSAL si uno de ellos es capaz de influir en el otro.)

60. El espacio tiempo plano de Minkowski - base de la relatividad especial - posee LA ESTRUCTURA CAUSAL MÁS SIMPLE y la considerada, en general, como natural.
61. Hemos visto antes que la presencia de un campo gravitatorio DESVIABA los rayos de luz;
62. EN VIRTUD DE ELLO, CONFIGURA una estructura causal diferente de la geometría plana.
63. EN PARTICULAR, los conos de luz se inclinan y el futuro de cualquier suceso queda modificado.
64. Una representación de ESTOS FENÓMENOS se da en la figura 3, donde se ha exagerado un poco el campo gravitatorio de la Tierra.
65. ESTOS CAMBIOS DE LA ESTRUCTURA CAUSAL son decisivos para el desarrollo de las singularidades, como veremos en seguida.

PÁRRAFO 7

66. **¿Hasta dónde puede cambiar un campo gravitatorio intenso LA ESTRUCTURA CAUSAL?**
67. Hay múltiples respuestas A ESTA CUESTIÓN.
68. PERO quizá lo más llamativo sea que LA RESPUESTA MÁS RADICAL fue ya dada por Pierre Simon Laplace nada más y nada menos que ¡en 1798!

69. LAPLACE, mucho antes del advenimiento de la RG, demostró que la fuerza atractiva [gravitatoria] de un cuerpo pesado podría ser tan grande que la luz no sería capaz de fluir fuera de él.
70. SU RAZONAMIENTO es simple y claro.
71. DE ÉL se deduce que un cuerpo esférico concentrado en un radio menor que su radio de Schwarzschild, r_s , impedirá que las cosas -luz incluida- escapen fuera de tal radio.
72. Para hacernos una idea del orden de magnitud de R_s , señalemos que tiene un valor de 1 centímetro para la Tierra y de 3 kilómetros para el Sol.
73. EN OTRAS PALABRAS, si toda LA TIERRA estuviera concentrada en una esfera de menos de un centímetro de radio, quedaríamos atrapados irreversiblemente en su campo de gravitación y, además, seríamos invisibles desde fuera.
74. LAS COSAS son más complejas que como se representan en el diagrama de la figura 4;
75. LA PROPIA MATERIA DEL CUERPO siente la irresistible atracción que ejerce sobre sí misma y tiende a caer hacia el centro.
76. Más adelante veremos un diagrama espacio-temporal DE LA SITUACIÓN REAL, pero antes debemos adentrarnos en la historia de la RG.

Singularidades y agujeros negros

PÁRRAFO 8

77. Poco tiempo después de la publicación de LAS ECUACIONES DE LA RG por Einstein, el alemán Karl Schwarzschild encontró en 1916 la solución de dichas ecuaciones para un cuerpo aislado, estático, de masa total M y con simetría esférica.
78. SU solución tenía una singularidad $r = 0$;
79. no LE PREOCUPÓ mucho, pues pensó que era equivalente a la que aparecía en otros campos de la física clásica.
80. Presentábase, SIN EMBARGO, OTRA ZONA SINGULAR en $r = r_s = 2GM/c^2$, de ahí el nombre de radio de Schwarzschild.
81. Después se sabría que LA ZONA DEFINIDA POR $r = r_s$ no constituía ninguna singularidad real, sino un horizonte, esto es, una membrana unidireccional en el espacio-tiempo que permite el paso de partículas hacia dentro, pero no hacia fuera.
82. Preocupado por ESTA ZONA EXTRAÑA, Schwarzschild calculó una solución en el interior del cuerpo que creaba el campo, y concluyó, no sin cierta satisfacción, que tal cuerpo nunca podría rebasar su radio de Schwarzschild.

PÁRRAFO 9

83. LAS COSAS parecían volver a su lógico orden.
84. POSTERIORMENTE, los premios Nobel Subrahmanyan Chandrasekhar, de la Universidad de Chicago, y Ley Landau, de la Universidad de Moscú, en 1931 y

1932 respectivamente, establecieron un límite superior para la masa de las estrellas degeneradas -enanas blancas-.

85. El significado y las implicaciones de ESTE RESULTADO son obvios, ya que si una estrella, en el curso de su evolución llegara al estado de enana blanca con una masa mayor que la dada por el límite de Chandrasekhar, entonces no podría permanecer en equilibrio en tal estado y continuaría contrayéndose.
86. En 1939, Oppenheimer junto con Volkoff y Snyder extendió EL TRABAJO DE CHANDRASEKHAR a estrellas de neutrones;
87. si UNA ESTRELLA llega a su estado final de evolución con una masa mayor que cierto límite, entonces seguirá contrayéndose indefinidamente, concluyó.
88. SUS cálculos indicaban que ciertas estrellas dotadas de gran masa podían colapsar y sobrepasar su radio de Schwarzschild.
89. TODO ELLO era una inevitable consecuencia de que la gravedad es siempre atractiva.

PÁRRAFO 10

90. El camino hacia los agujeros negros quedaba ASÍ nuevamente abierto.
91. Una vez aceptado que CIERTAS ESTRELLAS PUEDEN COLAPSAR MÁS ALLÁ DE SU RADIO R_s , sólo faltaba comprender qué pasaba en aquella zona extraña que aparecía en la solución de Schwarzschild para r_s .
92. Después del trabajo pionero de Eddington fue en los años 1958-60 cuando se entendió por fin la estructura global de LA CITADA SOLUCIÓN, a través de los artículos publicados por Finkelstein, Fronsdal, Kruskal y Szekeres.

93. TODOS ELLOS pusieron de manifiesto la naturaleza de horizonte de la región $r = r_s$, y de qué forma esta región separaba dos zonas diferenciadas, una interna que se denomina agujero negro y una externa más o menos normal.
94. Cualquier observador en LA ZONA EXTERNA puede entrar en el agujero negro, pero ningún observador ni señal alguna pueden salir del agujero a la zona externa.

PÁRRAFO 11

95. ASÍ PUES, los colapsos gravitatorios predichos por Chandrasekhar y Oppenheimer conducían a la aparición de LOS AGUJEROS NEGROS.
96. PERO ADEMÁS, de TODOS ESTOS ESTUDIOS se desprendía que cualquier tipo de materia, incluida la estelar, caería irremediabilmente al centro $r = 0$, una vez se encontrara en el agujero negro.
97. Se producía ASÍ una región ($r = 0$) donde la densidad de materia era infinita y el espacio-tiempo se rompía y desaparecía: una singularidad.
98. Parecía, PORTANTO, que el primer tipo esencial de singularidad en RG quedaba establecido.
99. Para estudiar EL OTRO TIPO, el de la gran explosión, debemos volver a pasearnos por la historia de la RG y de la cosmología.

La singularidad inicial

PÁRRAFO 12

100. Einstein se percató muy pronto de que, dado que LA INTERACCIÓN GRAVITATORIA dominaba a grandes escalas, podía aplicar SU NUEVA TEORÍA DE LA RG para calcular y el campo gravitatorio del universo y, obtener, por añadidura, la geometría del espacio-tiempo subyacente.
101. Comenzaba ASÍ la cosmología relativista.
102. Creíase EN ESAS FECHAS que EL UNIVERSO era estático -o sea, más o menos inmutable-.
103. POR ESO, Einstein se llevó una gran sorpresa cuando observó que las ecuaciones de su teoría no admitían SOLUCIONES ESTÁTICAS RAZONABLES.
104. Para superar ESTE PROBLEMA, introdujo en sus ecuaciones un nuevo término, la constante cosmológica.
105. CON ESTA CONSTANTE, Einstein presentó un modelo cosmológico que fue seguido inmediatamente por otro modelo publicado por Willen de Sitter en 1917.
106. ESTA ÚLTIMA SOLUCIÓN contenía una singularidad ficticia (en realidad un horizonte), lo cual provocó cierta polémica entre Einstein y de Sitter, más o menos resuelta en el libro de Arthur Stanley Eddington The Mathematical Theory of Relativity (1923).
107. En 1922 y 1924, el matemático soviético A. Friedman estudió los primeros modelos cosmológicos CON SINGULARIDAD REAL;
108. SU trabajo fue ampliado posteriormente por A.P. Robertson y más tarde por Walker.

109. ESTOS MODELOS constituyen la base de la actual cosmología estándar.

PÁRRAFO 13

110. Desde un punto de vista experimental, el hecho más importante para LA COSMOLOGÍA DE LOS AÑOS TREINTA fue el descubrimiento, realizado por Edwin Hubble en 1929, del desplazamiento hacia el rojo de las rayas espectrales de las galaxias distante y, como consecuencia, la relación lineal entre la distancia de tales galaxias a nosotros y su velocidad de alejamiento.

111. EL RESULTADO DE ELLO sería la aceptación de un universo en expansión.

112. Hay CORRIMIENTO HACIA EL ROJO en el modelo de Sitter, aunque entonces la interpretación que se le daba era de otro tipo.

113. Lemaître fue quien primero calculó LOS CORRIMIENTOS AL ROJO en modelos similares a los de Friedman -no estáticos-, y su trabajo impresionó tanto a Eddington que éste le dio bastante publicidad.

114. Se empezó a aceptar lo que hoy llamaríamos la interpretación normal de TALES CORRIMIENTOS AL ROJO, a pesar de que con ello algunos modelos cosmológicos presentaban una singularidad espacio-temporal.

PÁRRAFO 14

115. Einstein comprendió que LA CONSTANTE COSMOLÓGICA era más bien arbitraria, apreciación que compartió Richard Tolman, quien también presentó un modelo cosmológico no estático.

116. Grosso modo, podemos resumir LAS POSTURAS DE LOS AÑOS TREINTA en dos clases- los que usaban la constante cosmológica y lo que prescindían de ella -principalmente Einstein y Tolman - y estudiaban modelos en expansión, todos los cuales poseían una singularidad inicial, conocida hoy como «gran explosión».
117. LOS MODELOS ESTÁNDAR DE FRIEDMAN-ROBERTSON-WALKER eran los únicos que satisfacían el principio cosmológico, que afirma que el universo es homogéneo (todos sus puntos son equivalentes) e isótropo (todas las direcciones espaciales son equivalentes).
118. ESTE PRINCIPIO se basa en la observación de que el universo se nos aparece isótropo a nosotros y en la aceptación de que no ocupamos un lugar privilegiado, siguiendo las ideas iniciadas por Copérnico y Galileo.

PÁRRAFO 15

119. ESTOS ÚLTIMOS MODELOS contienen una singularidad inicial que es, de hecho, una creación u origen de todo el universo.
120. ANTES DE LA GRAN EXPLOSIÓN no había espacio-tiempo.
121. TAN SINGULAR PROPIEDAD no molestaba entonces a los físicos, ya que la inmensa mayoría pensaba que se debía a la excesiva simetría de las soluciones y que, en un pasado remoto -cerca de la gran explosión-,el estricto principio cosmológico no sería cierto, debido a la inevitable aparición de irregularidades.
122. A PESAR DE TODO, el modelo de mayor éxito hasta los años sesenta era el del estado estable, formulado por Hermann Bondi, Fred Hoyle y otros.

123. ESTE MODELO estaba en expansión y no tenía singularidad, aunque necesitaba una continua creación de materia.
124. ENTRETANTO, fue George Gamow el primero en realizar un cálculo moderno de aparición de elementos en LOS MODELOS DE FRIEDMAN;
125. aunque CONOCÍA la existencia de la singularidad inicial, como otros muchos no le concedió importancia, pues pensaba que se debía a una fase previa de contracción del universo en la que toda la materia se había deshecho en sus constituyentes elementales (partículas elementales).
126. Fue ÉL con sus colaboradores, quien predijo la existencia, si los modelos de gran explosión eran correctos, de una radiación de fondo, fósil de épocas antiguas superdensas y muy calientes.
127. La detección de ESTA RADIACIÓN DE FONDO por Arno A. Penzias y Robert W. Wilson, de los laboratorios Bell, en 1964 es, quizás, el descubrimiento de mayor relevancia para la cosmología y, ni que decir tiene, una indicación sólida de que el universo había pasado, en tiempos remotos, por una fase extremadamente compacta, muy densa y a alta temperatura.
128. EN POSTERIORES OBSERVACIONES se ha detectado que ESTA RADIACIÓN DE FONDO es altamente isótropa, lo cual nos lleva a considerar seriamente la posibilidad de que el universo sea de tipo Fredman-Robertson-Walker ahora y lo haya sido en etapas anteriores.
129. EN CONSECUENCIA, quizá debamos aceptar la singularidad inicial.

PÁRRAFO 16

130. PERO, al mismo tiempo que se detectó LA RADIACIÓN DE FONDO, Penrose

estaba gestando, en 1964, el que sería un resultado de fundamental importancia y que abriría la puerta para el desarrollo de los teoremas.

Teoremas de singularidades

PÁRRAFO 17

131. Ya sabemos que LAS SINGULARIDADES aparecen en diferentes situaciones físicas dentro del marco de la RG.
132. ¿Se deben ESTAS SINGULARIDADES a la idealización de los problemas y a la excesiva simetría impuesta para abordarlos?
133. EN EL CASO DE COLAPSO GRAVITATORIO, supusimos que el cuerpo que se contraía poseía simetría esférica y que el colapso preservaba esta situación altamente perfecta.
134. TAL POSIBILIDAD no es realista:
135. bastan pequeñas desviaciones de la simetría esférica para provocar que no todo COLAPSARA en el centro $r=0$ y evitar así la singularidad.
136. ADEMÁS, aunque EL UNIVERSO parece isótropo, no lo es en puridad, habida cuenta de la existencia de irregularidades locales (las galaxias, por ejemplo).

PÁRRAFO 18

137. Se necesitaba, PUES, una respuesta A ESTAS CUESTIONES para poder aceptar o desechar las singularidades.

138. EL PRIMER PROBLEMA, SIN EMBARGO, era cómo definir el concepto de singularidad.
139. Porque LAS SINGULARIDADES no forman parte del espacio-tiempo, los físicos no saben decir casi nada acerca de ellas.
140. Podría pensarse que UNA SINGULARIDAD viene definida por una zona donde alguna magnitud espacio-temporal se hace infinita, pero esto no es en absoluto cierto.
141. Para Penrose, se dice que UN ESPACIO-TIEMPO contiene UNA SINGULARIDAD cuando existen observadores que tienen un final repentino o un comienzo espontáneo.
142. La razón para dar ESTA DEFINICIÓN un tanto extraña y rebuscada es la lógica suposición de que las líneas de universo de cualquier observador no debería tener un final ni un principio, por obvia comparación con el espacio-tiempo plano.
143. POR OTRO LADO, es trivial ver que cuando existen SINGULARIDADES hay OBSERVADORES con un final súbito, o con un principio ex nihilo.

PÁRRAFO 19

144. Penrose se planteó «la cuestión» [...] de si LA SINGULARIDAD [en el colapso estelar] es, de hecho, simplemente una propiedad de la alta simetría...
145. La materia COLAPSA radialmente al único punto central, así que la catástrofe resultante en el espacio-tiempo quizá no es sorprendente.

146. La presencia de perturbaciones que destrazan LA SIMETRÍA ESFÉRICA ¿no podría alterar LA SITUACIÓN drásticamente?
147. CON ESTE PREFACIO y el bagaje de refinadas técnicas matemáticas desarrolladas por él mismo, Penrose demostró la presencia de singularidades en el colapso estelar si se suponen ciertas condiciones razonables.

PÁRRAFO 20

148. **¿Cuáles son ESTAS SUPOSICIONES?**
149. Esencialmente TRES.
150. PRIMERO impuso UNA CONDICIÓN DE ENERGÍA, esto es, una condición según la cual la energía es siempre no negativa, lo que implica que la interacción gravitatoria sea siempre atractiva; suposición que está avalada por una firme base experimental.
151. SEGUNDO, adoptó UNA FORMA PARTICULAR DE CONDICIÓN DE CAUSALIDAD;
152. EN ESTE CASO CONCRETO fue LA CONDICIÓN según la cual todos los observadores deberían pasar, una y una sola vez, por el espacio definido en un instante de tiempo dado.
153. Se puede obtener una idea intuitiva de ESTA CONDICIÓN observando que, en los diagramas de las figuras 2-5, cualquier línea de universo corta los planos $t =$ constante una y una sola vez.
154. Penrose impuso POR ÚLTIMO, UNA CONDICIÓN INICIAL, a saber la existencia de una superficie cerrada atrapada.

155. ESTAS SUPERFICIES son aquellas en las que su futuro causal está incluido en su interior.
156. CON ESTAS TRES CONDICIONES Penrose demostró de forma sencilla pero tajante que el espacio-tiempo debería contener líneas de universo incompletas, o sea, singularidades.

PÁRRAFO 21

157. La importancia de ESTE TEOREMA es doble.
158. POR UNA PARTE, INDICA que las desviaciones de la simetría esférica no impiden la formación de singularidades en el colapso gravitatorio, ya que según los resultados de Chandrasekhar y Oppenheimer parece claro que en tales situaciones existirán superficies atrapadas.
159. SEGUNDO, Y QUIZÁ MÁS IMPORTANTE, IMPULSÓ y ESTIMULÓ a otros físicos a estudiar y extender ESTOS RESULTADOS.
160. ASÍ fue como Geroch y, principalmente, Hawking publicaron UNA SERIE DE RESULTADOS CALIFICADOS COMO TEOREMAS DE SINGULARIDADES.
161. HAWKING obtuvo TEOREMAS aplicables a la cosmología y, en particular, a la singularidad inicial;
162. TODOS presentaban el mismo esqueleto: una condición de energía, otra de causalidad y, finalmente, una condición inicial.
163. En 1970, HAWKING y Penrose presentaron el que sería EL TEOREMA DE SINGULARIDADES POR EXCELENCIA.

164. EN ESTE TEOREMA combinaron TODOS SUS RESULTADOS ANTERIORES y debilitaron las condiciones a exigir, de manera que incluía la mayor parte de las situaciones físicas de interés.
165. Aunque POSTERIORMENTE hubo mejoras de LOS TEOREMAS por medio de los trabajos de Frank J. Tipler, Clarke y otros, EL RESULTADO ESENCIAL es el contenido en el teorema de Hawking y Penrose.

PÁRRAFO 22

166. Podemos resumir ESTE RESULTADO de la siguiente forma.
167. En el colapso gravitatorio, LA SINGULARIDAD es inevitable siempre que se formen regiones atrapadas.
168. La aparición de ÉSTAS no está rigurosamente probada, pero todo parece indicar que así será a través de la extensión realizada de los trabajos de Chandarsekhar y Oppenheimer y, también por la observación de la existencia de púlsares: estrellas de neutrones de masa enorme y radio muy pequeño.
169. EN EL CASO DE LA COSMOLOGÍA, POR OTRA PARTE, hay dos posibilidades.
170. Si el universo es cerrado -finito espacialmente- de nuevo PARECE INEVITABLE LA APARICIÓN DE REGIONES ATRAPADAS, como prueba la existencia observada experimentalmente, de la radiación de fondo;
171. la alta isotropía de ÉSTA, a su vez, denuncia LA POSIBLE EXISTENCIA DE UNA SINGULARIDAD, que normalmente se interpreta como la gran explosión.

172. POR EL CONTRARIO, si el universo es abierto -espacialmente infinito-, LA EXISTENCIA DE REGIONES ATRAPADAS NO PARECE OBLIGADA y hay casos con singularidad y casos sin ella.
173. Los teoremas de SINGULARIDADES apoyan PUES la idea de la consustancialidad de éstas con la RG, siempre que supongamos condiciones físicamente realistas.
174. PERO, ¿es ESTO realmente así?
175. Aún no hemos hablado de UN TERCER TIPO DE SINGULARIDAD que surge en la RG: la de la colisión de ondas gravitatorias.

Colisión de ondas gravitatorias.

PÁRRAFO 23

176. OTRA DE LAS PREDICCIONES DE LA RG -aún sin confirmación experimental definitiva- es la existencia de ONDAS DE GRAVEDAD que se propagan, como las ondas electromagnéticas, a la velocidad de la luz.
177. En la actualidad hay una gran inversión de medios tanto técnicos como humanos para la detección de TAN DÉBILES ONDAS.
178. En todos los campos de la física, LAS ONDAS MÁS SIMPLES son las ondas planas, que aparecen de forma aproximada en regiones suficientemente pequeñas muy alejadas de las fuentes que las originan.
179. Uno de los primeros problemas que cualquier físico tratará de entender en cualquiera de ESTOS CAMPOS es el de la colisión de ONDAS.

PÁRRAFO 24

180. Podemos obtener una idea sencilla de UNA COLISIÓN DE ONDAS pensando en lo que ocurre cuando lanzamos dos piedras a un lago, y en cómo las olas - ondas de agua- que estas piedras generan chocan e interfieren constructiva o destructivamente.
181. En general, LOS CASOS DE COLISIÓN estudiados en física son lineales - o sea, obedecen el llamado principio de superposición - y la onda resultante no es más que la simple suma de las ondas iniciales.
182. ASÍ, POR EJEMPLO, si la cresta de UNA ONDA coincide en un punto con la cresta de la otra onda, el resultado será una cresta de altura la suma de las alturas de cada una de las crestas iniciales y lo mismo ocurre en un punto con dos valles.
183. POR EL CONTRARIO, si UNA CRESTA coincide con un valle, ambos de igual magnitud, el resultado es la anulación de la onda.

PÁRRAFO 25

184. La situación en RG es BASTANTE DISTINTA.
185. La interacción de ondas gravitatorias es no lineal.
186. El resultado producido en SU colisión difiere, POR TANTO, DEL ANTEDICHO y resulta inesperado.
187. Las primeras soluciones obtenidas que describían COLISIÓN DE ONDAS PLANAS GRAVITATORIAS fueron presentadas por Khan y Penrose e, independientemente, por Szekeres en los primeros años de la década de los setenta.

188. EL RESULTADO era la aparición, un tiempo finito después del primer instante de colisión, de una singularidad espacio-temporal que provocaba la catastrófica desaparición del espacio-tiempo.
189. ADEMÁS, ESTA SINGULARIDAD era independiente de las intensidades de las ondas iniciales.
190. TAN EXTRAÑA SITUACIÓN podría no sorprendernos después de toda la discusión anterior y de los teoremas de singularidades.
191. PERO ESTA SINGULARIDAD es profundamente distinta a las anteriores y, como vamos a ver, es mucho mas problemática.

PÁRRAFO 26

192. LAS SINGULARIDADES TRADICIONALES DE LA FÍSICA se consideran benignas por dos razones:
193. REPRESENTAN las fuentes y no destruyen el espacio-tiempo.
194. La gran explosión y los agujeros negros no cumplen LA SEGUNDA PROPIEDAD, pero todavía mantienen LA PRIMERA ya que son singularidades donde se concentra la materia que es fuente del campo gravitatorio.
195. Podríamos, PUES calificar de semibenignas a ESTAS SINGULARIDADES y, con una postura optimista, esperar que una adecuada teoría para la materia dentro de la RG suavice la semicatástrofe que producen.
196. LA SINGULARIDAD del choque de ondas, CONTRARIAMENTE, ocurre en un espacio-tiempo vacío sin materia-, y no hay posible interpretación optimista.

197. Al no satisfacer ninguna de las propiedades de benignidad, LA SINGULARIDAD DE LA COLISIÓN DE ONDAS podría ser calificada de maligna.
198. ESTE PROBLEMA ha sido expuesto claramente en diferentes ocasiones, en particular por W.B. Bonnor.

PÁRRAFO 27

199. El examen más pertinente DEL PROBLEMA se debe a Tipler, quien considera - en contra de la opinión de Perese y Khan- que LA APARICIÓN DE SINGULARIDADES EN LA COLISIÓN DE ONDAS PLANAS depende crucialmente de la suposición de planitud de las ondas.
200. (UNA SUPOSICIÓN que es altamente idealizada e irrealizable de forma exacta en la realidad)
201. Si ESTE RESULTADO fuera cierto, quizá podríamos recuperar el optimismo, pero la falta de soluciones exactas que describan LA COLISIÓN DE ONDAS NO PLANAS deja abierta la cuestión.
202. POR LO DEMÁS ESTA SINGULARIDAD MALIGNA reabre la cuestión de hasta qué punto la excesiva simetría es la causa de las singularidades y de si, en general, debemos culpar a la propia teoría de la RG, y a sus posibles fallos, de la aparición de singularidades; o, por el contrario, de si las singularidades son algo realmente existente.
203. PERO, ¿cuál es la situación actual DEL PROBLEMA DE LAS SINGULARIDADES?

Existencia de singularidades y RG

PÁRRAFO 28

204. Pudiera creerse que las condiciones de energía - o sea, que la energía sea siempre positiva y, por tanto, la gravedad siempre atractiva - implican necesariamente LAS SINGULARIDADES por medio de la RG.
205. ESA IDEA, bastante extendida, es falsa.
206. Según hemos visto, LOS TEOREMAS DE SINGULARIDADES presuponen otras hipótesis, aparte de una condición de energía; por ejemplo, las condiciones de causalidad.
207. POR ELLO, unida a AQUELLA IDEA FALSA suele ir la creencia de que LAS CONDICIONES DE ENERGÍA implican, a través de la RG, SINGULARIDADES o violación de LA CAUSALIDAD.
208. DE NUEVO, ESO también es falso ya que, además de CONDICIONES DE ENERGÍA Y CAUSALIDAD, LOS TEOREMAS DE SINGULARIDADES dependen esencialmente de un tercer tipo de condiciones, a saber, las condiciones iniciales:
209. en todos los casos ESTAS CONDICIONES implican la existencia de regiones causalmente atrapadas ya sea en el futuro o en el pasado.
210. La conclusión que podemos obtener de la falsedad de ESTAS DOS IDEAS es directa, y un análisis objetivo y detallado del tema nos permite afirmar que la RG no implica, necesariamente, la existencia de singularidades.

PÁRRAFO 29

211. Me gustaría abundar en ESTE TEMA, pues LA AFIRMACIÓN ANTERIOR podría calificarse de heterodoxa.
212. Nada más lejos de LA REALIDAD.
213. Existen muchísimas soluciones de las ecuaciones de Einstein DE LA RG LIBRES DE SINGULARIDADES.
214. Lo que sucede es que se comete EL ERROR GENERALIZADO de confundir dos cuestiones diferentes.
215. LA PRIMERA es LA ANTEDICHA AFIRMACIÓN.
216. LA SEGUNDA es:
217. ¿Tiene SINGULARIDADES nuestro universo?
218. La respuesta a ESTA PREGUNTA puede ser afirmativa, debido principalmente a la posible existencia de regiones atrapadas.
219. Pero ESTO ÚLTIMO es un hecho observacional y no forma parte del cuerpo teórico básico de la RG.
220. La comprensión de ESTA DIFERENCIA debería eliminar el carácter heterodoxo de la negación de la implicación necesaria de las singularidades por la RG.

PÁRRAFO 30

221. En el caso de la cosmología y la singularidad inicial, la aceptación de ESAS IDEAS FALSAS se basaba en el hecho de no haberse encontrado soluciones exactas cosmológicas -modelos cosmológicos- sin singularidades.
222. ESTO ha cambiado recientemente, debido a un modelo presentado por el autor que satisface las condiciones de energía y causalidad en sus versiones más fuertes, que verifica además otras muchas condiciones realistas, que tiene un carácter obviamente cosmológico y que no presenta singularidades.
223. EN ESTE MODELO, aunque la materia colapsa por su propia atracción, un gradiente de presión impide que colapse indefinidamente y la obliga a rebotar y comenzar a expandirse.
224. TODO ELLO es una pura y simple consecuencia de la no existencia, EN ESTE MODELO, de regiones atrapadas.
225. La aparición de ESTA SOLUCIÓN ha causado cierto revuelo y me gustaría señalar que simplemente nos indica, o mejor, recuerda, la veracidad de las anteriores consideraciones sobre la no implicación directa de las singularidades por la RG.
226. PERO ESTE MODELO no puede dar una descripción completa del universo real, el cual muy bien podría haberse originado en una singularidad inicial, aunque, repito, a fuerza de parecer pesado, eso no es una consecuencia de la RG, sino de un dato observacional como la existencia e isotropía de la radiación de fondo y de posibles regiones atrapadas.

PÁRRAFO 31

227. TODO LO ANTERIOR nos conduce, a mi parecer, a una nueva pregunta.
228. Aceptando las dos posibilidades reales, en pie de igualdad aproximadamente, de SOLUCIONES CON Y SIN SINGULARIDADES, y aceptando asimismo que nuestro universo parece haberse originado en una singularidad inicial, ¿por qué el universo ha escogido un origen tan singular?
229. ESTA CUESTIÓN podría parecer más filosófica que científica, pero la cosmología se plantea preguntas similares muy a menudo.
230. Baste como BOTÓN DE MUESTRA lo siguiente:
231. el hecho de que NUESTRO UNIVERSO sea bastante homogéneo e isótropo en la actualidad sólo parece poder explicarse con la suposición de condiciones iniciales muy especiales -y que forman una parte despreciable dentro del conjunto de todas las posibles condiciones iniciales-, lo cual ha llevado al estudio de modelos inflacionarios, por ejemplo.
232. DE LA MISMA FORMA podríamos preguntarnos el porqué de la elección del UNIVERSO DE CONDICIONES INICIALES ESPECIALES -o, al menos, en pie de igualdad con otras- tales como la gran explosión.
233. No sé si la respuesta a ESTA CUESTIÓN está a nuestro alcance hoy en día, pero al menos deberíamos ser lo suficiente honestos como para planteárnosla.

PÁRRAFO 32

234. Cambiando un poco EL DISCURSO, es necesario plasmar aquí las posturas de los relativistas con respecto a las singularidades.

235. Como norma general, TODOS aceptan el hecho de que las singularidades indican un límite de validez para la teoría de la RG.
236. EN OTRAS PALABRAS, a las altísimas energías a las que aparecen las singularidades, LA RG no es UNA TEORÍA FIABLE -no hemos podido comprobarla experimentalmente bajo tales condiciones extremas- y, por consiguiente, una teoría más adecuada y general sería necesaria.
237. EN ESTE SENTIDO, la postura absolutamente mayoritaria es aquella según la cual se espera que la combinación de los efectos cuánticos con los gravitatorios nos proporcione una solución satisfactoria del PROBLEMA.
238. Desafortunadamente, la teoría cuántica de la gravedad parece RESISTIRSE, y todos los intentos PARA SU CONSECUCCIÓN han sido infructuosos hasta la fecha.
239. Como siempre, la solución y la comprensión finales de ESTAS CUESTIONES sólo el tiempo y el esfuerzo nos las darán.

PÁRRAFO 33

240. Para acabar ESTE BREVE REPASO POR EL MUNDO DE LAS SINGULARIDADES EN LA RG, desearía plasmar mi personal opinión de que las singularidades plantean un problema abierto aún en estos días, y a pesar de los teoremas de singularidades.
241. ASÍ, quisiera terminar enunciando una pequeña serie de preguntas que, a mi entender, necesitan urgente respuesta.
242. ¿Cómo resolver EL PROBLEMA DE LA SINGULARIDAD MALIGNA en la colisión de ondas gravitatorias?

243. ¿Qué tipo de solución es más genérica EN RG, la que tenga o la que no tenga UNA SINGULARIDAD?
244. Si AMBOS TIPOS son igualmente genéricos, aproximadamente, ¿bajo qué razonamiento aceptar o desechar UNAS U OTRAS?
245. EN ESTE SENTIDO, ¿por qué el universo habría elegido tener su origen EN UNA SINGULARIDAD INICIAL?
246. ¿es posible probar UN TEOREMA DE NO SINGULARIDADES, estableciendo bajo qué condiciones físicamente realistas una solución no tendrá SINGULARIDADES?

PÁRRAFO 34

247. ESTAS Y OTRAS MUCHAS PREGUNTAS que no incluimos en aras de la brevedad no tienen una respuesta satisfactoria todavía.
248. Y, lo que a mi parecer es PEOR, no se LES está dedicando la atención que merecen.
249. Cualquier aproximación a una respuesta a ESAS CUESTIONES nos ayudará indudablemente a la definitiva comprensión de las singularidades en RG y, en particular, a profundizar en el posible origen -y el posible destino- de la materia.

ANEXO 11
ESPECTROSCOPIA ASTROFISICA CON FIBRAS OPTICAS

- 0.1. LAS FIBRAS ÓPTICAS pueden transformar imágenes bidimensionales en unidimensionales.
- 0.2. En astrofísica, PERMITEN la observación simultanea de un gran numero de objetos o de muchas regiones de un objeto extenso.

PÁRRAFO 1

1. La metodología empleada EN ASTROFÍSICA difiere de la que caracteriza a otras ramas de las ciencias físicas.
2. EN ÉSTAS, la experimentación constituye la base sobre la que se fundamenta el conocimiento;
3. el investigador astrofísico, POR CONTRA, se ve incapaz, en general, de realizar TAL ACTIVIDAD.
4. EXPERIMENTAR implica cierto poder de interacción y control sobre el sistema físico sometido a estudio.
5. AHORA BIEN, LOS OBJETOS ASTROFÍSICOS se presentan como sistemas físicos de acceso muy limitado, con los que apenas podemos interactuar.
6. POR EJEMPLO, NO PODEMOS PROVOCAR LA EXPLOSIÓN DE UNA SUPERNOVA, ni favorecer el nacimiento de una galaxia, ni dejar caer una estrella sobre un agujero negro, para comprobar experimentalmente teorías o modelos.

PÁRRAFO 2

7. MÁS AÚN. TAMPOCO PODEMOS, salvo algunas excepciones, simular en el laboratorio los procesos físicos que ocurren en el resto del universo.
8. LA RAZÓN es evidente:
9. las escalas de energía, espacio y tiempo que involucran LOS PROCESOS ASTROFÍSICOS difieren, en varios órdenes de magnitud, de las que definen nuestro entorno cercano.
10. ESTOS HECHOS explican que, en astrofísica, la experimentación deje paso a la observación.
11. POR OBSERVACIÓN entendemos el proceso de detección y registro de algún tipo de señal (generalmente, radiación electromagnética) procedente de los objetos en estudio.
12. ESTA SEÑAL, que suele venir determinada por múltiple efectos simultáneos, se interpreta en el marco de modelos fundamentados en las leyes de la física.
13. DE ESTA FORMA, se infiere la información acerca de los objetos en estudio.

PÁRRAFO 3

14. La historia de la astronomía y la astrofísica nos enseña que los grandes avances han sido consecuencia, a menudo, de una mejora en LA CAPACIDAD DE OBSERVACIÓN.
15. La invención del telescopio óptico, así como la aplicación de la fotografía y espectroscopía en este contexto, son CLAROS EJEMPLOS.

16. Aunque los orígenes de la astronomía se encuentran en la observación del cielo a ojo desnudo (sin ayuda de instrumentos), LA INVENCION DEL TELESCOPIO ÓPTICO aceleró el firme desarrollo de esta ciencia.
17. GRACIAS AL TELESCOPIO no sólo fue posible agrandar la imagen de algunos objetos astronómicos, sino que, al captar más radiación que la recogida por la pupila, se consiguió ver otros nuevos.
18. LA APLICACIÓN DE LA FOTOGRAFÍA EN ASTRONOMÍA supuso TAMBIÉN un gran avance al permitir registrar de forma duradera imágenes y espectros, posibilitando análisis cuantitativos más detallados.

PÁRRAFO 4

19. La capacidad de descomponer la luz con la ayuda de espectrógrafos provocó un cambio cualitativo en el estudio de LOS OBJETOS ASTRONÓMICOS.
20. La interpretación de los espectros llevó a inferir las condiciones físicas y composición química de ESTOS OBJETOS, así como aspectos relativos a su cinemática.
21. Es, quizá LA ESPECTROSCOPIA la técnica que provocó el nacimiento de una nueva rama de la astronomía: la astrofísica.
22. A diferencia de LA ASTRONOMÍA TRADICIONAL, que se ceñía a los aspectos morfológicos y dinámicos, LA NUEVA DISCIPLINA comenzó a ocuparse del estudio físico de los astros.
23. OTRAS TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA LUZ, como la fotometría o la interferometría, han resultado también de gran interés EN ASTROFÍSICA al ayudar a resolver problemas de índole física.

24. La extrapolación de TODAS ESTAS TÉCNICAS DE OBSERVACIÓN a otras regiones del espectro electromagnético, a las que no son sensibles nuestros ojos ni la mayor parte de las emulsiones fotográficas, como el radio, infrarrojo, ultravioleta, rayos X y rayos gamma, ha contribuido de forma notable al desarrollo de LA ASTROFÍSICA a lo largo de este siglo.

PÁRRAFO 5

25. El proceso de mejorar NUESTRA CAPACIDAD DE OBSERVAR no cesa.

26. POR UNA PARTE, LOS TELESCOPIOS ESPACIALES acceden a regiones espectrales que quedan total o parcialmente bloqueadas por la atmósfera, evitando las perturbaciones que ésta produce.

27. POR OTRA, gracias al desarrollo de GRANDES TELESCOPIOS TERRESTRES, podemos recoger la luz de objetos muy débiles y lejanos, en el espacio y en el tiempo.

PÁRRAFO 6

28. AHORA BIEN, no todos los esfuerzos están dirigidos a evitar LOS EFECTOS DE LA ATMÓSFERA o a construir TELESCOPIOS CAPACES DE RECOGER MÁS RADIACIÓN.

29. CON IGUAL INTENSIDAD se intenta optimizar el proceso de detección de la radiación.

30. PARA TAL FIN se construyen complejos instrumentos, que aprovechan los recientes avances en distintos campos de la técnica, en particular de la óptica instrumental, la electrónica, la física de detectores y la informática.

31. EN ESTE CONTEXTO DE LA INSTRUMENTACIÓN ASTRONÓMICA, están mostrando su utilidad las fibras ópticas al elevar espectacularmente el rendimiento de la observación en algunos estudios.

PÁRRAFO 7

32. LAS FIBRAS ÓPTICAS son conductos flexibles que permiten transmitir la luz.

33. SU origen podría buscarse en los sistemas de canalización de la luz construidos para iluminar almacenes y minas subterráneas a finales del siglo pasado.

34. ESTOS SISTEMAS utilizaban tubos huecos, revestidos interiormente de un material reflectante, para transportar la luz.

35. EL PRINCIPIO era sencillo:

36. una vez que LOS RAYOS DE LUZ se introducían por un extremo del tubo, se propagaban en su interior, reflejándose cada vez que encontraban la superficie interna del mismo, hasta alcanzar el otro extremo.

37. En las fibras ópticas modernas LA LUZ se transmite de forma ANÁLOGA.

38. MAS para conseguir que LOS RAYOS DE LUZ se reflejen en su interior éste se construye con dos tipos diferentes de vidrio o plástico.

39. LA PARTE MÁS INTERNA, llamada núcleo, tiene un índice de refracción superior al de la externa, o recubrimiento.

40. En general, cuando la luz se propaga en un medio y encuentra OTRO DE ÍNDICE DE REFRACCIÓN INFERIOR, parte de la misma se refracta (se transmite en el

medio de menor índice mayor) y parte se refleja continuando su propagación al medio de índice mayor.

PÁRRAFO 8

41. LA PROPORCIÓN DE LUZ REFLEJADA depende exclusivamente del ángulo con el que incide la luz sobre la superficie de separación de LOS DOS MEDIOS;
42. A PARTIR DE UN DETERMINADO ÁNGULO, LA REFLEXIÓN es total.
43. POR TANTO, si introducimos UN RAYO DE LUZ en el interior del núcleo de la fibra, de forma que las incidencias sobre la superficie que separa el núcleo del recubrimiento se produzcan con un ángulo igual o superior al de la reflexión total, éste se propagará por el núcleo de la fibra.
44. Ni siquiera es necesario que exista una discontinuidad en el índice de refracción para que la luz se propague por EL INTERIOR DE UNA FIBRA.
45. ALGUNAS, LAS LLAMADAS FIBRAS DE ÍNDICE GRADUAL, se construyen con un material cuyo índice de refracción disminuye de forma continua hacia el exterior.
46. EN EL INTERIOR DE ESTAS FIBRAS, los rayos de luz se propagan describiendo trayectorias sinusoidales.

PÁRRAFO 9

47. Los primeros pasos hacia la incorporación de LAS FIBRAS ÓPTICAS en la instrumentación astronómica los dieron, en la década de los setenta, Roger Angel y su grupo, de la Universidad de Arizona.

48. BUSCABAN cómo transportar a un único instrumento y MEDIANTE FIBRAS ÓPTICAS, la luz recogida por varios telescopios.
49. ESTO permitirá aumentar la superficie colectora de forma que, si no se produjesen pérdidas en la transmisión, observar con, por ejemplo, 10 telescopios de un metro cuadrado de superficie colectora, equivaldría a observar con un único telescopio de 10 metros cuadrados de superficie colectora.
50. LA VENTAJA era evidente, pues desde el punto de vista tecnológico la complicación y el coste a la hora de construir telescopios aumenta espectacularmente con su tamaño.

PÁRRAFO 10

51. Para analizar las posibilidades prácticas DEL MONTAJE, en 1979 el grupo de Angel realizó la primera observación astronómica utilizando una fibra óptica de 20 metros:
52. TRANSPORTABA la luz desde el foco de un telescopio hasta la entrada de un espectrógrafo.
53. El resultado DEL ENSAYO fue positivo:
54. quedó demostrado que, bajo algunas condiciones, no se producían pérdidas importantes en LA TRANSMISIÓN.
55. Comenzó a pensarse en las ventajas de LA FIBRAS ÓPTICAS, incluso trabajando con un solo telescopio.

56. LA CONEXIÓN DEL FOCO DEL TELESCOPIO AL INSTRUMENTO, MEDIANTE UNA FIBRA ÓPTICA, ofrece la ventaja de poder aislar aquél y éste mecánicamente:
57. EL INSTRUMENTO no tiene por qué estar acoplado al TELESCOPIO, el cual necesariamente debe moverse y estar a la temperatura ambiente, lo que permite mantener unas condiciones de estabilidad excepcionales.
58. ESTA IDEA se emplearía LUEGO en varios observatorios especialmente con instrumentos destinados a medidas de velocidades radiales muy precisas de los objetos celestes.
59. Cualquier cambio de orientación o temperatura EN ESTOS INSTRUMENTOS puede alterar las mediciones obtenidas;
60. POR ESO, SE COLOCAN aislados mecánicamente del telescopio, en habitaciones con la temperatura controlada, inyectándose la luz a los mismos a través de una fibra óptica.

PÁRRAFO 11

61. En 1980, John Hill y colaboradores, del Observatorio de Steward, propusieron OTRA APLICACIÓN DE LAS FIBRAS que, sin duda, ha sido la que mayores éxitos ha cosechado.
62. LA IDEA BÁSICA consistía en conectar, MEDIANTE FIBRAS ÓPTICAS, diferentes partes del plano focal del telescopio en la entrada de un espectrógrafo.
63. ESTO permitiría analizar espectralmente varios objetos de forma simultánea.

64. Con la construcción de un instrumento, que llamaron MEDUSA, demostraron que sus ideas eran factibles, al realizar con el mismo ESPECTROSCOPIA SIMULTÁNEA DE OCHO GALAXIAS.
65. PERO veamos con más detalle el interés y el fundamento de ESTE TIPO DE ESPECTROSCOPIA, LLAMADA MULTIOBJETO.

PÁRRAFO 12

66. Cuando trabajamos CON UN ESPECTRÓGRAFO CONVENCIONAL sólo podemos descomponer y analizar la luz de zonas unidimensionales o lineales.
67. ESTA LIMITACIÓN se debe a que una de las dos dimensiones del detector se utiliza como dirección espectral, sobre la cual se distribuyen las diferentes longitudes de onda, quedando, por tanto, una única dimensión para registrar información espacial.
68. EN CONSECUENCIA, UN ESPECTRÓGRAFO CONVENCIONAL no puede analizar simultáneamente toda la luz recibida en el plano focal del telescopio;
69. al ser ÉSTE bidimensional, nos vemos obligados a escoger un corte unidimensional del mismo, donde debemos colocar la rendija o entrada del espectrógrafo.
70. ESTA LIMITACIÓN restringe enormemente el número de objetos que pueden analizarse espectralmente de forma simultánea.
71. En la práctica LA OBSERVACIÓN ESPECTROSCÓPICA DE VARIOS OBJETOS CON UN ESPECTRÓGRAFO CONVENCIONAL se realiza de forma secuencial, aun cuando todos los objetos estén en el plano focal del telescopio.

PÁRRAFO 13

72. PERO las fibras pueden reordenar o modificar LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS OBJETOS que aparecen en una imagen;
73. en especial, si ÉSTOS son tan sencillos como los que suelen encontrarse en el plano focal de un telescopio.
74. ESTA REORDENACIÓN O MODIFICACIÓN se consigue conectando los extremos de un conjunto de fibras sobre la imagen real, o parte de la misma, y disponiendo el otro extremo con la configuración espacial deseada.
75. En nuestro contexto, el interés de ESTA CAPACIDAD DE LAS FIBRAS reside en poder transformar la distribución real y bidimensional de los objetos (en el plano focal) a una distribución unidimensional o lineal.
76. ESTA NUEVA DISPOSICIÓN DE LOS OBJETOS permite que sean analizados simultáneamente por un espectrógrafo.
77. ESTA APLICACIÓN tiene interés en trabajos que requieren la observación de un gran número de objetos que aparecen agrupados.
78. ES el caso de los estudios realizados en cúmulos estelares y de galaxias.

PÁRRAFO 14

79. Basándonos en ESOS MISMOS PRINCIPIOS podremos analizar simultáneamente diferentes regiones de un objeto extenso (espectroscopía bidimensional).
80. EN ESTE CASO, y por medio de las fibras ópticas, transformaremos su morfología real bidimensional en unidimensional, para su análisis espectrográfico.

81. ESTE TIPO DE APLICACIÓN es de utilidad en el estudio de galaxias, supernovas, nebulosas, regiones de hidrógeno ionizado, etcétera.

PÁRRAFO 15

82. Evidentemente, cuantas más fibras podamos utilizar mayor será EL NÚMERO DE OBJETOS O REGIONES QUE PUEDEN SER OBSERVADOS A LA VEZ, pues cada fibra transporta la radiación de cada uno de ellos.
83. PERO hay límites prácticos AL NÚMERO DE FIBRAS que admite un espectrógrafo.
84. Factores muy diversos, relacionados con el diseño óptico DEL ESPECTRÓGRAFO y con las características de los detectores empleados en astrofísica, determinan DICHO NÚMERO que ha oscilado entre 30 y 70 para la mayoría de los sistemas de espectroscopía multifibra construidos hasta ahora.

PÁRRAFO 16

85. LA UTILIZACIÓN DE LAS FIBRAS ÓPTICAS PARA REALIZAR ESPECTROSCOPÍA MULTIOBJETO Y BIDIMENSIONAL tiene OTRA VENTAJA, además de aumentar el rendimiento CON LA OBSERVACIÓN SIMULTÁNEA DE MUCHOS OBJETOS O MUCHAS REGIONES DE UN OBJETO EXTENSO.
86. No olvidemos que LAS OBSERVACIONES realizadas desde la tierra se hacen a través de un medio, la atmósfera, el cual está sujeto a variaciones temporales.
87. ADEMÁS, a lo largo de una exposición el telescopio debe seguir apuntando en la misma dirección, por lo que va alterando su orientación para corregir el efecto

de rotación terrestre y, así, LA OBSERVACIÓN transcurre a través de una zona de atmósfera cambiante.

88. PUES BIEN, cuando utilizamos una configuración con fibras ópticas como las comentadas arriba, todos los objetos o zonas de un objeto extenso SE OBSERVAN BAJO LAS MISMAS CONDICIONES ATMOSFÉRICAS, lo cual facilita el análisis posterior de los resultados.
89. ADEMÁS, la resolución de un espectrógrafo depende directamente de la distribución de intensidades DEL OBJETO en la rendija o entrada del mismo.
90. EN UN ESPECTRÓGRAFO CONVENCIONAL ESTA DISTRIBUCIÓN varía con las condiciones atmosféricas y la estabilidad del guiado del telescopio durante el tiempo que dura la exposición.
91. SIN EMBARGO cuando alimentamos UN ESPECTRÓGRAFO por medio de una fibra óptica, debido al gran número de reflexiones que tienen lugar en su interior, la distribución de intensidad a la salida ofrece un perfil independiente de los factores comentados arriba (condiciones atmosféricas y guiado) y, por tanto permite la observación a resolución constante.

PÁRRAFO 17

92. Para aprovechar ESTAS POSIBILIDADES QUE OFRECEN LAS FIBRAS ÓPTICAS EN ASTROFÍSICA, conocidas a principio de la década de los años ochenta, hay que resolver nuevos problemas de índole práctica, que serán posteriormente analizados.
93. DE MANERA PARALELA se ha ido desarrollando un trabajo básico, orientado a estudiar las propiedades y características de diferentes tipos de fibras con el fin de seleccionar las más adecuadas para ESTA APLICACIÓN.

94. En general, LAS PROPIEDADES EXIGIDAS A LAS FIBRAS PARA SU APLICACIÓN EN ASTROFÍSICA son diferentes de las requeridas en telecomunicaciones.
95. EN AQUÉLLAS resulta muy importante reducir las pérdidas por observaciones internas en bandas espectrales relativamente estrechas mientras que EN ASTROFÍSICA, al emplearse fibras de menor longitud, la transmisión no es el parámetro más crítico.
96. Como veremos hay OTROS FACTORES MÁS RELEVANTES.
97. LAS EMPLEADAS EN ASTROFÍSICA son fibras de sílice, multimodo y con índice de refracción discontinuo, por razones que se verán más adelante.

PÁRRAFO 18

98. El primer problema que surge EN ESPECTROSCOPIA MULTIOBJETO CON FIBRAS ÓPTICAS es el de colocarlas en las posiciones exactas que ocupan los objetos en el plano focal.
99. Debido a la difracción producida por el telescopio y, sobre todo, al efecto de la atmósfera terrestre, la distribución de intensidad EN EL PLANO FOCAL DE UNA ESTRELLA U OTRO OBJETO NO RESUELTO no es exactamente puntual, sino que cubre una pequeña zona espacial.
100. ESTA PEQUEÑA ZONA donde se encuentra la mayor parte de la intensidad procedente de la estrella, conocida con el nombre de disco de visión («seeing»), tiene unas dimensiones angulares en torno a 1 segundo de arco, lo que implica, para un telescopio estelar típico, unas dimensiones espaciales de unos 0,2 milímetros de diámetro.

PÁRRAFO 19

101. Para evitar que la fibra transmita radiación procedente del fondo del cielo que rodea al objeto, debemos ajustar el diámetro de su núcleo al DEL DISCO DE VISIÓN.
102. ELLO nos obliga a emplear fibras multimodo de unas pocas décimas de milímetro de diámetro.
103. ADEMÁS, EL DIÁMETRO DE LAS FIBRAS debe ser de ESE ORDEN DE MAGNITUD para conseguir la resolución espectral adecuada para la mayoría de las aplicaciones en astronomía.
104. No es fácil acoplar en el plano focal FIBRAS DE ESTE DIÁMETRO.
105. Se exige conocer con precisión las posiciones que ocupan los objetos EN EL PLANO FOCAL y, luego, instalar LAS FIBRAS ÓPTICAS con escasa decenas de micra de error.
106. Imprecisiones en las medidas astrométricas de los objetos, sus posibles movimientos propios, aberraciones producidas por el telescopio, la refracción atmosférica y efectos de dilatación y compresión causados por cambios de temperaturas son algunos de los motivos que pueden atentar contra LA EFICACIA DE ESE ACOPLAMIENTO.

PÁRRAFO 20

107. LOS PRIMEROS SISTEMAS utilizaban una placa metálica, taladrada en las posiciones de las estrellas, conocidas de antemano gracias a una fotografía tomada con el telescopio;

108. las fibras ópticas se pegaban EN LA PLACA METÁLICA.
109. EL PROCESO resultaba bastante engorroso y muy poco flexible:
110. había que repetir TODAS LAS OPERACIONES en cada campo de observar.
111. En 1984 Peter Gray, del Observatorio Anglo-australiano, presentó EL SISTEMA FOCAP («FIBER OPTICS COUPLED APERTURE PLATE»).
112. EN ESTE SISTEMA se sustituía el pegamento por unos conectores, lo que posibilitaba que el mismo haz de fibras se aprovechara en diferentes campos;
113. BASTABA con cambiar las placas metálicas.

PÁRRAFO 21

114. Hoy LAS PLACAS se construyen en máquinas guiadas por ordenador, que corrige los efectos de dilatación y compresión, de aberraciones por la óptica del telescopio y otros.

PÁRRAFO 22

115. El sistema MX, presentado en 1986 por John Hill y colaboradores, del Observatorio de Steward, propone una tercera vía para resolver EL PROBLEMA DEL ACOPLAMIENTO DE LAS FIBRAS EN EL PLANO FOCAL.
116. ESTE SISTEMA consta de 32 robots independientes para mover y colocar otras tantas fibras ópticas sobre el plano focal del telescopio.

117. PROTOTIPOS DE SISTEMAS DE ESTE TIPO manejan simultáneamente del orden de 50 fibras, que colocan en sus posiciones en unos pocos minutos.
118. ESTOS SISTEMAS, gracias a su flexibilidad, permiten variar cómodamente el campo de observación y corregir los efectos derivados de una mala astrometría del campo, de movimiento propios, de refracción atmosférica, etcétera.

PÁRRAFO 23

119. EL PROBLEMA DE SITUAR LAS FIBRAS EN EL PLANO FOCAL se reduce cuando se realiza espectroscopía simultánea de muchas regiones de un objeto extenso, es decir, espectroscopía bidimensional.
120. PARA ESTA APLICACIÓN se construyen haces de fibras con una determinada configuración espacial fija en el extremo que se conecta al PLANO FOCAL DEL TELESCOPIO.
121. ESA CONFIGURACIÓN ESPACIAL se suele definir de acuerdo con las características de un conjunto de objetos.
122. Para no perder información sobre LA ESTRUCTURA MORFOLÓGICA DE LOS OBJETOS, el muestreo espacial o, en otras palabras, la separación entre fibras colaterales debe ser del orden del radio del disco de visión.
123. ESTO obliga a utilizar paquetes compactos de fibras que, para abarcar zonas bidimensionales de suficiente extensión, exigen un número muy elevado de fibras.
124. Para conseguir un buen guidado del telescopio durante una exposición, o, en otras palabras, para evitar que la radiación que se propaga por una fibra

provenza de diferentes partes del objeto, se conecta, A TRAVÉS DE HACES COMPACTOS DE FIBRAS, varias estrellas brillantes que aparecen en el plano focal del telescopio con el fotocátodo de un sistema de televisión.

125. Cualquier movimiento relativo ENTRE EL OBJETO EN ESTUDIO Y EL HAZ DE FIBRAS (debido a cambios en el apuntado del telescopio) afecta también a las estrellas brillantes y se traduce en una variación de intensidad en la pantalla de televisión, lo que nos permite corregir la posición del telescopio.

PÁRRAFO 24

126. Una vez introducida la luz EN EL INTERIOR DE LAS FIBRAS, se propaga por el interior de las mismas.
127. Aunque LA CANTIDAD DE LUZ TRANSMITIDA depende de las características de la fibra empleada, suele superar el 90 por ciento para fibras de sílice con longitudes de entre 1 y 10 metros y en rango espectral desde 400 hasta 900 manómetros.
128. Una de las razones por las que LA TRANSMISIÓN RESULTA TAN ALTA es porque los rayos de luz procedentes del telescopio inciden con un ángulo adecuado para que las reflexiones internas sean muy eficientes.
129. MENOR RENDIMIENTO se consigue en la zona más azul del espectro electromagnético y en algunas bandas del infrarrojo.
130. Cuando se opera EN UNO DE ESOS RANGOS ESPECTRALES se eligen fibras que, sacrificando su transmisión en uno de ellos, mejore su comportamiento en el otro.

131. La cantidad de contaminante hidroxilo (OH), empleado en la construcción de LA FIBRA, permite modificar la transmisión EN ESTAS ZONAS.
132. ASÍ las fibras «húmedas» consiguen MEJORES TRANSMISIONES EN EL ULTRAVIOLETA CERCANO;
133. POR TALES se entiende aquellas a las que, durante el proceso de fabricación, se les aumenta la proporción de OH.
134. Como contrapartida, ESTE RADICAL produce unas fuertes bandas de absorción en 950 manómetros.
135. LO CONTRARIO ocurre con las fibras «secas», a las que se disminuye la proporción de OH para mejorar su transmisión en el infrarrojo cercano.

PÁRRAFO 25

136. LA CONEXIÓN ENTRE LA SALIDA DE LA FIBRA Y EL ESPECTRÓGRAFO suele resultar bastante ineficiente.
137. ESTO es debido a que EN EL INTERIOR DE LAS FIBRAS se produce un efecto conocido con el nombre de «degradación de la razón focal».
138. Como consecuencia de ESTE EFECTO, el haz de luz a la salida de la fibra diverge más rápidamente de lo que lo haría si se hubiese propagado en el aire.
139. ESTE EFECTO es más acusado cuando se trabaja con razones focales «lentas» (haces de luz que convergen o divergen lentamente), y se comprende su importancia si tenemos en cuenta que la salida de la fibra se coloca en el foco del primer componente óptico del espectrógrafo, que es una lenta o un espejo colimador.

140. Si LA RAZÓN FOCAL se degrada, las dimensiones de ESTE COMPONENTE deben ser grandes para poder recoger toda la luz, lo que complica el diseño del espectrógrafo.
141. OTRA OPCIÓN es utilizar colimadores de menor distancia focal, pero ESTO dificulta obtener una resolución espectral aceptable.
142. En cualquier caso, el rendimiento global del sistema está en relación inversa con la degradación de LA RAZÓN FOCAL producida por las fibras.
143. Hay muchos factores que influyen en la magnitud de LA DEGRADACIÓN DE LA RAZÓN FOCAL, como el perfil del índice de refracción en la estructura de la fibra, la calidad del pulido de las caras externas, las presiones a las que están sujetas en los bordes, la geometría que adquieren las propias fibras, etc.
144. Porque las fibras de índice de refracción gradual DEGRADAN EN UNA MAYOR PROPORCIÓN LA RAZÓN FOCAL, se prefieren fibras de índice de refracción discontinuo.

PÁRRAFO 26

145. LOS SISTEMAS DE FIBRAS ÓPTICAS han de vencer otro obstáculo: su poca versatilidad a la hora de modificar la configuración de observación.
146. Cuando se realiza espectroscopía bidimensional, interesa poder MODIFICAR LA CONFIGURACIÓN ESPACIAL DE LAS FIBRAS en el plano focal;
147. lo mismo EN ESTE CASO que en espectroscopía multiobjeto conviene poder variar la resolución espectral en función de las características del objeto y las condiciones atmosféricas.

148. El sistema HEXAFLEX, construido en 1989 por José Luis Rasilla, Evencio Mediavilla y el autor de este artículo en el Instituto de Astrofísica de Canarias, para el telescopio de 4.2 metros del Observatorio de Roque de los Muchachos, ofrece una alternativa para aumentar LA VERSATILIDAD DE ESTOS SISTEMAS.
149. EL SISTEMA consta de tres haces de 61 fibras, cada uno definido para diferentes aplicaciones.
150. El acoplamiento entre LOS HACES DE FIBRAS Y EL ESPECTRÓGRAFO es tal que pueden ser intercambiados, por lo que es posible modificar el modo de observación (multiobjeto/bidimensional) y la resolución espacial y espectral de manera rápida y estable.

PÁRRAFO 27

151. Los resultados obtenidos hasta la fecha con ESPECTRÓGRAFOS EQUIPADOS CON FIBRAS ÓPTICAS Y DESTINADOS A LA ESPECTROSCOPIA MULTIOBJETO O BIDIMENSIONAL han sido prometedores.
152. Baste UN PAR DE EJEMPLOS.
153. En 1989, un grupo de astrónomos del Observatorio Europeo del Hemisferio Sur (ESO) realizaron ESPECTROSCOPIA DE MÁS DE 700 GALAXIAS en el corto espacio de cuatro noches.
154. PARA ELLO UTILIZARON el sistema OCTOPUS, diseñado para realizar espectroscopía multiobjeto y equipado con 52 fibras, y cuya última versión fue presentada en 1989 por Gerardo Avila, de ESO.

155. En 1990, y utilizando el sistema HEXAFLEX, hemos registrado en sólo una noche MÁS DE 600 ESPECTROS correspondientes a diferentes zonas de un grupo de tres galaxias.
156. Para acometer ESTE TIPO DE OBSERVACIONES con instrumentos convencionales hubiera sido necesario un factor entre 10 y 20 veces más de tiempo de observación, estando más expuestos a inestabilidades e inhomogeneidades de todo tipo.

PÁRRAFO 28

157. GANANCIA TAN ALTA aparece sólo cuando los objetos de interés se agrupan de forma adecuada en el plano focal, o cuando se desea realizar espectroscopía bidimensional de objetos que tienen un cierto rango de tamaño.
158. FUERA DE ESTAS SITUACIONES la espectroscopía óptica con sistemas de fibras puede resultar menos rentable que la realizada con espectrógrafos tradicionales.
159. La observación de un objeto puntual resulta más eficiente con los sistemas habituales que recurriendo A LAS FIBRAS.
160. LO MISMO sucede con objetos extensos, si no se requiere información bidimensional.

PÁRRAFO 29

161. Son muchos los programas que se benefician ya del uso de ESPECTRÓGRAFOS EQUIPADOS CON FIBRAS, gracias a los cuales se acometen observacio-

nes impensables hace pocos años por su elevadísimo coste en tiempo de observación:

162. mediciones sistemáticas de corrimiento al rojo cosmológico en cúmulos de galaxias, abundancias químicas de estrellas pertenecientes a cúmulos globulares, medidas de velocidades y parámetros físicos en la zona más interna de galaxias activas y cuásares, son EJEMPLOS DE PROGRAMAS para los que los sistemas multifibra parecen la mejor opción.

PÁRRAFO 30

163. El futuro de ESTOS INSTRUMENTOS resulta prometedor.

164. EN PRIMER LUGAR son continuos LOS PROGRESOS para superar los problemas derivados del acoplamiento de las fibras en el plano focal, así como los orientados a evitar los efectos de la degradación de la razón focal.

165. El desarrollo de detectores bidimensionales CCD («Charged Coupled Device») de gran formato puede aumentar por un factor 2 0 3 el número de fibras adaptables a ESTOS SISTEMAS.

166. A ESTO hay que unir la construcción de espectrógrafos de nuevo diseño, capaces de admitir ESTE MAYOR NÚMERO DE FIBRAS.

167. El diseño de grandes telescopios para su empleo específico con fibras ópticas constituye OTRA REALIDAD.

168. La óptica de ESTOS TELESCOPIOS está optimizada para seguir un gran campo de visión exento de aberraciones y escalas lineales del plano focal adecuadas para su utilización con fibras.

169. EL TELESCOPIO DE RASTREO ESPECTROSCÓPICO SST («ESPECTROSCOPIC SURVEY TELESCOPE»), propuesto en 1988 por Lawrence Ramsey, se enmarca EN ESTE CONTEXTO.

PÁRRAFO 31

170. OTRAS APLICACIONES DE LAS FIBRAS EN ASTROFÍSICA - pensemos en su uso en fotometría e interferometría visible o espectrometría infrarroja -, pueden revestir también gran interés en un futuro no muy lejano.
171. EN EL ÁMBITO DE LA INTERFEROMETRÍA EN EL RANGO VISIBLE, las fibras ópticas ofrecen la posibilidad de combinar coherentemente la luz recogida por un conjunto de pequeños telescopios;
172. se emplean fibras monomodo, con un núcleo de diámetro entre 4 y 10 micras, que puede ser del orden del tamaño del disco de visión cuando se trabaja CON TELESCOPIOS DE PEQUEÑA APERTURA.

PÁRRAFO 32

173. EN FOTOMETRÍA ASTRONÓMICA A TRAVÉS DE FIBRAS ÓPTICAS, la idea es similar a la que subyace en espectroscopía multiobjeto:
174. LAS FIBRAS transportan la luz de los objetos de interés desde el plano focal del telescopio a la entrada de un fotómetro equipado con varios detectores o con un detector bidimensional.
175. PERO EN ESTE CASO pueden utilizarse las dos dimensiones del detector para distribuir LOS OBJETOS;

176. GRACIAS A ELLO, EL NÚMERO DE OBJETOS que pueden observarse simultáneamente es elevadísimo.
177. PERO ESTA APLICACIÓN tiene un inconveniente: la baja calidad fotométrica de las fibras ópticas.
178. Las variaciones en la configuración geométrica de LAS FIBRAS, tensiones sobre las mismas y, sobre todo, variaciones de la posición de la imagen del objeto sobre el núcleo atentan contra EL RENDIMIENTO DE LA TRANSMISIÓN.

PÁRRAFO 33

179. POR ÚLTIMO, la posibilidad de aplicar LOS CONCEPTOS Y TÉCNICAS DESARROLLADAS en el rango visible en el infrarrojo cercano constituye ya una realidad gracias a los detectores bidimensionales sensibles en esta región del espectro electromagnético.
180. SE HAN DESARROLLADO fibras de fluoruro de circonio y vidrios calcogénidos de una altísima transmisión de hasta 4 micras, con aceptables niveles de flexibilidad.
181. La necesidad o no de enfriar LAS FIBRAS, la forma de minimizar LA RADIA-CIÓN INFRARROJA DE FONDO y otros problemas permanecen abiertos a la investigación.

ANEXO 12

CÉLULAS SOLARES MUY EFICIENTES

0. En el laboratorio se ha conseguido hasta UN 35 POR CIENTO DE RENDIMIENTO en la conversión de energía solar en eléctrica, cifra que triplica la eficiencia media de LAS CÉLULAS SOLARES comerciales y aumenta su rentabilidad.

1. Aunque la atención pública sobre LA ENERGÍA SOLAR no es hoy la que era tras la primera crisis de la energía, en 1973, la realidad es que en los últimos cinco años se han producido avances científicos que nos hacen contemplar con optimismo las posibilidades de llegar un día, no lejano, a obtener del sol una parte importante de la electricidad que consumimos.

PÁRRAFO 2

2. LA ELECTRICIDAD FOTOVOLTAICA DE ORIGEN SOLAR es inocua para el entorno.

3. LAS EMISIONES DE CO₂ Y DEMÁS GASES NOCIVOS OSCILAN ENTRE EL 1 % Y EL 30 % de las que despide una central moderna de carbón, teniendo en cuenta en todos los casos las operaciones de extracción, construcción y explotación.

4. A DIFERENCIA DE LOS OTROS MÉTODOS DE GENERACIÓN, LAS CÉLULAS SOLARES no necesitan agua para refrigeración, lo que reviste su interés en países secos como España.

5. El desecho sólido, producido tan sólo al desmantelarLAS una vez terminado su largo ciclo de vida (las células solares son virtualmente eternas), está constituido básicamente por chatarra de hierro y vidrio, y es menor que los residuos de baja radiactividad de una central nuclear que haya generado la misma electricidad.

PÁRRAFO 3

6. Ya hoy LA ELECTRICIDAD FOTOVOLTAICA es rentable en muchas aplicaciones en las que se requiere un consumo reducido en un lugar remoto;
7. CASOS TÍPICOS son los generadores eléctricos a bordo de los satélites artificiales y las instalaciones rurales en países en vías de desarrollo, aplicación esta última cuyo contenido social excede en mucho a su relevancia energética.
8. SIN EMBARGO, el reto sigue siendo abaratar ESTA ENERGÍA, aun cuando se ha avanzado mucho ya en ese sentido:
9. hoy ES unas siete veces más barata que hace veinte años, pero todavía hay que abaratarla entre dos y cuatro veces para que sea rentable en competencia con otras fuentes convencionales.
10. (O quizá, tan sólo, esperar que ÉSTAS suban de precio).

PÁRRAFO 4

11. Desde la primera crisis de la energía ha habido una saludable competencia entre dos concepciones sobre cómo lograr ESTE ABARATAMIENTO:

12. LOS QUE ABOGABAN POR UNA CÉLULAS SOLARES «ECONÓMICAS», con capas delgadas de un semiconductor estructuralmente poco perfecto y bajo coste por metro cuadrado, y QUIENES INSISTÍAN EN LA RENTABILIDAD DE LAS BUENAS CÉLULAS, aun cuando se usaran lentes o espejo, más baratos, para recoger la energía luminosa.

PÁRRAFO 5

13. En estos últimos cinco años se ha experimentado logros muy importantes en la consecución de ALTOS RENDIMIENTOS, algunos de ellos, como en el caso del silicio cristalino, por encima de expectativas más optimistas.
14. En este artículo nos vamos a ocupar exclusivamente de ESTAS CÉLULAS DE ALTO RENDIMIENTO.

PÁRRAFO 6

15. LAS CÉLULAS SOLARES se fabrican con material semiconductor, frecuentemente silicio.
16. Para estudiar LOS SEMICONDUCTORES es corriente hacer uso de un diagrama de bandas.
17. Se compone de TRES: la de valencia la prohibida y la banda de conducción.
18. El rango de energías de LA BANDA DE VALENCIA corresponde a las que tienen los electrones de valencia, es decir, los ligados a los átomos.
19. ESTOS ELECTRONES no poseen una energía fija, como en los átomos aislados, sino que presentan energía en todo el rango de dicha banda.

20. Como, en principio, no le falta al semiconductor ningún electrón de valencia, se dice que ESTA BANDA está llena, en el sentido de que no podemos introducir en ella ningún electrón adicional.

PÁRRAFO 7

21. LA BANDA DE CONDUCCIÓN está, en principio, vacía de electrones.
22. PERO si se arranca de su enlace un electrón de valencia, adquiere entonces una energía que lo sitúa dentro de ESA BANDA.

PÁRRAFO 8

23. Entre LA BANDA DE VALENCIA, que ocupa en el diagrama la parte inferior, Y LA DE CONDUCCIÓN, que se extiende en el tramo superior, hallamos la banda prohibida.
24. EN ÉSTA no se puede encontrar jamás (salvo excepciones que no vienen ahora al caso) ningún electrón, y cuya anchura, E_g , es una característica del semiconductor en cuestión.

PÁRRAFO 9

25. Por distintas causas puede haber electrones en LA BANDA DE CONDUCCIÓN.
26. LA MÁS FRECUENTE es que hayamos añadido cierta cantidad de impurezas llamadas donadoras, variable, entre 10^{12} y 5×10^{22} átomos por centímetro cúbico.

27. ESTAS IMPUREZAS, O DOPADO DEL MATERIAL introducen alguno de sus electrones en la banda de conducción.
28. AQUÍ, los electrones pueden moverse con entera libertad;
29. en determinadas circunstancias SU MOVIMIENTO produce una corriente eléctrica.
30. LOS SEMICONDUCTORES CON ABUNDANTES ÁTOMOS DONADORES, por ello buenos conductores de la electricidad, se llaman de tipo N.
31. (LOS ELECTRONES portan carga negativa)

PÁRRAFO 10

32. Otras impurezas, llamadas aceptadores (o aceptadoras), capturan UN ELECTRÓN de la banda de valencia y dejan en ella un hueco vacío de electrón:
33. ESTOS HUECOS se comportan como partículas dotadas de carga positiva que, en valor absoluto, es igual a la del electrón.
34. LOS HUECOS DE LA BANDA DE VALENCIA son también móviles, como los electrones de la banda de conducción.
35. Los semiconductores que conduce POR HUECOS se llaman de tipo P.

PÁRRAFO 11

36. LA MAYORÍA DE LOS DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES, la célula solar entre ellos, están constituidos por nanocristales semiconductores en los que se introducen donadores y aceptadores de manera desigual.

37. La estructura fundamental de UNA CÉLULA consta de base y emisores.
38. Consiste LA PRIMERA en una región central más o menos ancha, poco dopada, que se sitúa entre dos emisores, que son regiones superficiales, muy dopadas y con donadores y aceptadores, respectivamente.
39. Decimos que ES una estructura N^+PP^{++}
40. (PUEDE TAMBIÉN SER P^+IP^+ , donde la letra I designa una región sin dopaje apreciable, llamada intrínseca.)

PÁRRAFO 12

41. El diagrama de bandas de UNA CÉLULA SOLAR N^+PP^+ , en equilibrio térmico (es decir en oscuridad y sin que le hurguemos), presenta un nivel de energía llamado de Fermi.
42. EL NIVEL DE FERMI es horizontal, en tanto que las bandas, es decir, el límite superior de la de conducción y el inferior de la de valencia, adquieren relieves; sí se mantiene por doquier constante, igual a E_g , la separación entre ambas bandas.

PÁRRAFO 13

43. EL NIVEL DE FERMI define el potencial electroquímico de los electrones en el semiconductor.
44. LOS ELECTRONES fluyen siempre del nivel más alto al más bajo, por cuya razón en un semiconductor en equilibrio el nivel de Fermi ha de ser horizontal.

45. DESDE OTRO PUNTO DE VISTA, ESTE NIVEL cifra la cantidad de electrones y huecos que hay en cada lugar del semiconductor:
46. si SE ENCUENTRA cerca de la banda de conducción o dentro de la misma, entonces EL SEMICONDUCTOR tiene una alta densidad n de electrones (medida en electrones por centímetro cúbico), como ocurre en la región N^+ ;
47. si ESTÁ cerca de la banda de valencia, TIENE una alta densidad p de huecos, como en la región P^+ .

PÁRRAFO 14

48. Para que EL NIVEL DE FERMI esté cerca de la banda de conducción, como ocurre en una región N , debe estar, eso es obvio, lejos de la de valencia;
49. POR ESO, EN ESTAS REGIONES hay muy pocos huecos.
50. En equilibrio térmico, el producto np es constante en todo el semiconductor, SEA LA REGIÓN N O P .

PÁRRAFO 15

51. Cuando EL SEMICONDUCTOR se ilumina, los fotones de la luz solar pueden romper los enlaces, bombeando electrones desde la banda de valencia hasta la de conducción y generando así abundantes pares electrón-hueco.
52. EL FENÓMENO provoca la aparición de dos niveles de Fermi diferentes, que ahora se llaman pseudoniveles de Fermi, uno para los electrones y otro para los huecos, y en vecindad respectiva de la banda de conducción y de valencia.

53. EL PRODUCTO NP es ahora mayor que en equilibrio.
54. LOS PSEUDONIVELES DE FERMI ya no son estrictamente horizontales.
55. ESTO es una consecuencia de que el semiconductor no se halla ya en equilibrio, pues los electrones y huecos se mueven con velocidades proporcionales a las pendientes.
56. Las corrientes son TAMBIÉN proporcionales a la densidad de ELECTRONES O HUECOS.
57. POR ELLO, si LAS CORRIENTES son moderadas, LAS PENDIENTES de los pseudoniveles son pequeñas en regiones con alta densidad de electrones o huecos.

PÁRRAFO 16

58. ¿Cómo funciona UNA CÉLULA SOLAR?

59. Todos saben que se trata de UN DISPOSITIVO que, bajo iluminación suministra corriente.
60. La luz produce en ÉL numerosas generaciones de pares electrón-hueco.
61. MUCHOS DE ESTOS PARES se recombinan y los electrones caen de nuevo en la banda de valencia.
62. Una sencilla cuenta de balance establece que la corriente eléctrica de huecos, entregada al circuito exterior, que iguala al flujo de electrones que retorna al semiconductor, es la diferencia entre GENERADORES Y RECOMBINACIONES que se producen por segundo en todo el semiconductor.

63. (EN REALIDAD hay que multiplicar ESAS DIFERENCIAS por la carga del electrón, si se quiere tener la igualdad correctamente escrita.)
64. Es evidente que reducir LAS RECOMBINACIONES es una regla adecuada para aumentar la calidad de la célula solar.

PÁRRAFO 17

65. MÁS, para tener UNA BUENA CÉLULA, se requiere que, además de suministrar corriente, lo haga bajo un determinado voltaje, necesario para producir potencia eléctrica (que es precisamente el producto de la corriente por el voltaje).

PÁRRAFO 18

66. EN UNA CÉLULA SOLAR aparecen, lo hemos visto, relieves en las bandas de valencia y conducción.
67. ESTOS RELIEVES son, EN REALIDAD, diferencias de energía potencial entre distintos puntos de LA MISMA.
68. EN LA CÉLULA EN EQUILIBRIO LAS DIFERENCIAS DE ENERGÍA POTENCIAL se compensan con otras que aparecen entre el semiconductor y el metal de los electrones, y que son invariables con la iluminación.
69. EN RESUMEN, EN UNA CÉLULA SOLAR EN EQUILIBRIO no aparece ningún voltaje entre sus electrodos exteriores.
70. No HUBIERA PODIDO SER DE OTRO MODO sin violar los principios de la termodinámica.

PÁRRAFO 19

71. EN LA CÉLULA SOLAR, el contacto con los electrodos metálicos se hace sobre emisores N^+ y P^+ fuertemente dopados.
72. Cumplen ESAS REGIONES FUERTEMENTE DOPADAS una propiedad interesante:
73. la diferencia de energías entre el límite de la banda y el pseudo-nivel de Fermi de portadores mayoritarios (banda de conducción y pseudonivel de electrones, EN EMISORES N^+ , banda de valencia y pseudonivel de huecos EN EMISORES P^+) es fija e inalterable por la iluminación.

PÁRRAFO 20

74. Al separarse LOS PSEUDONIVELES por efecto de la iluminación, arrastran consigo modificaciones en la posición de las bandas, de cuantía igual a la separación entre pseudoniveles, lo que se traduce en una disminución de los relieves de las bandas que causan la aparición de un desequilibrio de los potenciales del sistema completo célula-metales y, en consecuencia, la creación de un voltaje exterior entre los electrodos de la célula solar.

PÁRRAFO 21

75. **¿Qué es, PUES, lo indispensable para construir UNA BUENA CÉLULA SOLAR?**
76. UN SEMICONDUCTOR poco recombinante con una región que absorba los fotones, en cuya superficie se sitúen dos regiones P^+ y N^+ , sobre las que se coloque los electrodos exteriores.

77. No es imprescindible LA REGIÓN CENTRAL P:
78. LA PROPIA REGIÓN P⁺ puede formar la base.
79. TAMPOCO es estrictamente necesario que LAS REGIONES P⁺ Y N⁺ estén situadas en las caras opuestas de la célula.

PÁRRAFO 22

80. Cuanto más se separen los pseudoniveles de Fermi, tanto más voltaje aparecerá entre los electrodos de LA CÉLULA, con el incremento consiguiente del producto np.
81. Puesto que las recombinaciones requieren que choquen ELECTRÓN CON HUECO, a mayor número de ambos más recombinaciones.
82. DE ELLO se deduce que LA TASA DE RECOMBINACIONES crece con el voltaje que aparece en la célula.
83. POR TANTO, EN UNA CÉLULA SOLAR a iluminación (y tasa de generaciones) constante la corriente extraída decrece con el voltaje;
84. A VOLTAJE NULO, conseguido conectando un hilo metálico entre los dos electrodos de LA CÉLULA (condición de cortocircuito), se producen menos recombinaciones por segundo que generaciones por segundo y la corriente casi iguala a estas últimas;
85. EN UNA CÉLULA DE SILICIO iluminada por una potencia luminosa como la solar, de 0,1 watts por centímetro cuadrado, LA CORRIENTE TÍPICA DE CORTOCIRCUITO QUE CIRCULA POR EL HILO es de 35-40 miliampère por cada centímetro cuadrado de célula.

PÁRRAFO 23

86. Cuando se desconecta EL HILO, impidiendo que fluya CORRIENTE AL EXTERIOR DE LA CÉLULA (condición del circuito abierto), las generaciones deben igualar a las recombinaciones.
87. ESTO sólo se consigue con elevados valores del producto np , que implican una separación de los pseudoniveles de Fermi y, con ello la aparición de un voltaje entre los electrodos (voltaje de circuito abierto).
88. VOLTAJE que en una célula de silicio en las condiciones de iluminación antes mencionada viene a ser del orden 600-640 milivolts.
89. Existe una amplia variedad de CASOS INTERMEDIOS, que resultan de la conexión de resistencias de diferentes valores en el circuito exterior, caracterizados por valores del voltaje y la corriente (cuyo cociente ha de ser la resistencia conectada), dando lugar así a la curva corriente-voltaje de utilización de célula solar.

PÁRRAFO 24

90. La potencia eléctrica extraída de LAS CÉLULAS SOLARES es igual, recordemos, al producto de la corriente por el voltaje.
91. Hay un valor máximo de ESA POTENCIA (correspondiente a una resistencia de carga óptima) que define a una situación intermedia en el que las recombinaciones son del orden del 5 al 10 por ciento de las generaciones, reduciéndose la corriente en este valor y alcanzando voltajes de 50 a 100 millivolts menos de los que se producen en circuito abierto.

92. El rendimiento de una célula solar se determina **EN ESTE PUNTO DE MÁXIMO POTENCIA (PMP)**:
93. SE DEFINE como el cociente de esta potencia eléctrica y la luminosa que incide sobre la célula.

PÁRRAFO 25

94. Cuando aumenta LA POTENCIA LUMINOSA lo hace el número de fotones y la tasa de generaciones.
95. Crece, ASIMISMO, LA CORRIENTE DE MÁXIMA POTENCIA Y EL VOLTAJE.
96. EN EFECTO, al haber MÁS GENERACIONES se producen más recombinaciones y, con ello, más separación de los pseudoniveles de Fermi;
97. resulta ASÍ que el rendimiento aumenta con LA POTENCIA LUMINOSA: de aquí el interés en trabajar con luz concentrada.

PÁRRAFO 26

98. **¿Cuáles son las limitaciones fundamentales de RENDIMIENTO DE UNA CÉLULA SOLAR?**
99. EN PRIMER LUGAR EL PROPIO DIAGRAMA DE BANDAS.
100. Cuando un fotón incide sobre LA CÉLULA, pueden ocurrir dos cosas: que el fotón no posea energía suficiente para bombear un electrón de la banda de valencia a la de conducción (fotones débiles), en cuyo caso el semiconductor

es transparente a dicho fotón, y su energía se pierde o bien que posea una energía superior a la separación E_g de las bandas de valencia y conducción, en cuyo caso se absorbe, desaparece y genera un par electrón-hueco muy en el interior de las mismas (fotones fuertes).

101. PERO EL ELECTRÓN desciende rápidamente a través del diagrama de bandas, hasta situarse próximo a su superficie;
102. EN AMBOS CASOS se produce energía térmica.
103. DE ESTE MODO, el exceso sobre E_g de la energía del fotón se convierte en calor y no puede recuperarse en forma de energía eléctrica.
104. SÓLO LOS FOTONES DE ENERGÍA MUY PRÓXIMA A E_g pueden aprovecharse razonablemente bien.

PÁRRAFO 27

105. NO PUEDE APROVECHARSE TODA LA ENERGÍA DE LA BANDA PROHIBIDA E_g : sólo la energía potencial correspondiente al voltaje con que la célula cede, en forma de corriente, este par electrón-hueco al circuito exterior.
106. (ENERGÍAS Y VOLTAJES se expresan con los mismos valores cuando las energías se miden en electrovolts -ev- y los voltajes en volts.)

PÁRRAFO 28

107. Para incrementar EL VOLTAJE conviene aumentar las generaciones mediante concentración de luz incidente, y, luego, reducir las recombinaciones hasta forzar la mayor separación de pseudoniveles de Fermi para una corriente dada.

108. LO PRIMERO tiene una limitación fundamental:
109. LA MÁXIMA POTENCIA LUMINOSA QUE SE PUEDE CONSEGUIR EN LA TIERRA es la misma que encontramos en la fotosfera solar, unas 50.000 Veces la potencia luminosa que incide sobre nuestro planeta.
110. El grupo de Roland Winston, de la Universidad de Chicago, acaba de anunciar CONCENTRACIONES DE 84.000x (el signo x se usa para indicar que es una potencia luminosa 84.000 veces mayor que la estándar, sin concentración de o, 1 watt por centímetro cuadrado) dentro de zafiro.
111. ESE VALOR es sólo alcanzable en el interior de un medio de alto índice de refracción n , en cuyo caso ese límite de 50.000 puede multiplicarse por n^2 ;
112. ES DECIR, para el zafiro EL LÍMITE es de 180.000x.

PÁRRAFO 29

113. Para reducir LAS RECOMBINACIONES hay que atacar la causa de las mismas.
114. Existe, SIN EMBARGO, UN TIPO DE RECOMBINACIÓN, la radiativa, que es inevitable porque constituye el mecanismo inverso a la absorción de fotones por el semiconductor.
115. SEGÚN ESTE MECANISMO, cuando chocan un electrón y un hueco se les ofrece cierta probabilidad de restablecer el enlace, cayendo el electrón en la banda de valencia y haciendo desaparecer el hueco de ella.
116. La energía liberada EN ESTE PROCESO se usa en la creación de un fotón con energía próxima a E_g .

117. ESTE FOTÓN puede ser absorbido a continuación, generando de nuevo el par electrón-hueco.
118. AHORA BIEN, si EL FOTÓN se ha creado cerca de la superficie del semiconductor, puede escapar del mismo, y la recombinación resulta definitiva.
119. CON ESTE CRITERIO, Hans Queisser y el premio Nobel William Shockley, por aquel entonces en la compañía Transistor Shockley de Palo Alto, determinaron en 1960 el voltaje y rendimiento máximos que se podía alcanzar en una célula solar.
120. REQUERIRÍA desde luego que trabajase a la máxima concentración alcanzable, antes mencionada.

PÁRRAFO 30

121. En nuestro equipo del Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid nos ocupamos entre otras cosas, de estudiar cómo acoplar la radiación luminosa a las células solares.
122. Siguiendo ESTA LÍNEA DE TRABAJO, Gerardo L. Araujo y Antonio Martí han añadido OTRA CONDICIÓN para alcanzar el límite de rendimiento:
123. mediante un sistema óptico apropiado, ASEGURARSE DE QUE TODOS LOS FOTONES EMITIDOS VAN A SER REENVIADOS AL SOL, no permitiendo, como lo hicieron Queisser y Shockley, su remisión hacia partes oscuras del universo.
124. EL LÍMITE DE RENDIMIENTO se eleva ASÍ un poco.

125. EN PARTICULAR, EL LÍMITE DE RENDIMIENTO es del 44 por ciento para una célula solar con E_g de 1,1 electronvolt
126. (el silicio tiene ESTE E_g).
127. CÉLULAS CON MENOR E_g no consiguen voltajes suficientes;
128. CON MAYOR E_g capturan, POR CONTRA, menos fotones y presentan corrientes demasiado bajas.

PÁRRAFO 31

129. Si ESE RENDIMIENTO nos parece bajo no hay que desesperar.
130. Podemos aceptarLO como el límite de rendimiento de una célula solar única, pero no como el del efecto fotovoltaico en su conjunto.

PÁRRAFO 32

131. La causa principal de pérdida de RENDIMIENTO radica en que sólo se aprovechan bien los fotones con energía próxima a E_g .
132. Para evitar ESE DERROCHE se fabrican múltiples células solares de materiales diferentes, cada una con su propio valor de E_g .
133. LAS recubrimos, una a una, con un filtro óptico que deje pasar sólo los fotones con energías próximas a su banda prohibida y refleje los otros.

134. TODAS ESTAS CÉLULAS pueden colocarse entonces en una cavidad, por ejemplo una esfera hueca, donde penetre la luz, concentrada al máximo, a través de un agujero o pupila de entrada.
135. Los fotones que no pueden entrar EN UNA CÉLULA por causa del filtro son reflejados por éste y terminan introduciéndose en la célula apropiada, ya que encontrar la salida de la cavidad les resulta más difícil.
136. PARA ELLO, es necesario que EL ÁREA DE CUALQUIER CÉLULA DEL CONJUNTO sea mucho mayor que la de la citada pupila de entrada.
137. Hay que disponer ADEMÁS de SUFICIENTES CÉLULAS para que cualquier fotón del espectro solar encuentre su célula adecuada.

PÁRRAFO 33

138. La cavidad o esfera hueca reenvía, hacia CADA CÉLULA, muchos de los fotones que se escapan de la propia célula, producidos por la recombinación radiactiva.
139. LOS CONTADOS QUE ESCAPAN DE LA CAVIDAD tornan directamente al sol por el sistema óptico, sin perderse en ninguna otra parte del universo.
140. EL RENDIMIENTO GLOBAL, sumando la potencia eléctrica obtenida de cada célula, es muy elevado: del 86,5 por ciento, según los cálculos de Araujo y Martí.

PÁRRAFO 34

141. Sabido es que el ciclo reversible de Carnot, así llamado en honor del físico francés Sadi Carnot, se aplica al comportamiento del gas en una máquina térmica.
142. (CONSTA de cuatro etapas - compresión adiabática, expansión isotérmica, expansión adiabática y compresión isotérmica- en su restablecimiento de la presión, volumen y temperatura de partida.)
143. Si se considera EL CICLO TERMODINÁMICO DE CARNOT que da lugar al máximo de rendimiento, aplicado al caso de un depósito de calor constituido por los fotones de la fotosfera solar, a 5487 grados C, y un segundo depósito el cristal semiconductor, a la temperatura ambiente de 27 grados C, nos da un rendimiento del 94,7 por ciento.
144. Ocorre, SIN EMBARGO, que LOS FOTONES, en flujo continuo, no constituyen EL DEPÓSITO CALIENTE necesario para ESE CICLO DE CARNOT.
145. Varios autores han demostrado que EL MAYOR RENDIMIENTO ALCANZABLE CON LOS FOTONES DEL SOL, independiente del dispositivo que se usa para extraer de ellos energía útil, coincide con el obtenido por Araujo y Martí.
146. LO QUE nos afianza en la seguridad de que EL DISPOSITIVO PROPUGNADO constituye un conversor ideal de energía solar.

PÁRRAFO 35

147. Por complicados que sean ESTOS ARTILUGIOS IDEALES, siempre nos sugieren algunas ideas prácticas.

148. Fraas y sus colegas en el centro de alta tecnología de la compañía Boeing, en Seattle, han desarrollado DOS CÉLULAS SOLARES DE ARSENIURO DE GALIO (ASGA) Y DE ANTIMONIURO DE GALIO (SBGA), DE VALORES RESPECTIVOS DE EG 1,4 Y 0,7 ELECTRONVOLTS;
149. LAS han colocado una debajo de la otra.
150. Muchos de los fotones débiles que no son absorbidos por EL ASGA pasan al SBGA donde, al ser fuertes, si se absorben.
151. LA IDEA no es nueva, pero el rendimiento obtenido por Fraas y colegas llega al 35 %, el máximo, según mis datos alcanzando hasta ahora (1991).

PÁRRAFO 36

152. EN EL MISMO ORDEN DE COSAS, Olson y sus colaboradores, del Instituto de Investigación de Energía Solar de Golden, han desarrollado una célula de fosforo de galio e indio (P_2 GaIn), con E_g alrededor de 1,9 electronvolts, crecida sobre una de AsGa ($E_g = 1,4$ electronvolt), que ha dado rendimiento conjunto de 27,3 por ciento sin concentración, el mayor conseguido hasta ahora en estas condiciones.
153. Aunque subsisten problemas para usar ESTA CÉLULA en concentración, quizá combinando estas dos células con una de SbGa, la una debajo de las otras, se llegue pronto al 40 por ciento.

PÁRRAFO 37

154. ESTAS ESTRUCTURAS son muy complejas y caras, incluso para utilizarlas en concentración.

155. No puede descartarse que se consiga un abaratamiento de LAS MISMAS, pero el uso de las células de silicio, económicas y con una industria muy desarrollada, está probablemente más próximo.
156. ¿Cuál es el rendimiento que se puede alcanzar CON ESTE MATERIAL?
157. A la respuesta de ESTA PREGUNTA vamos a dedicar ahora algún espacio.

PÁRRAFO 38

158. EL SILICIO es un material algo singular, comparado con los otros semiconductores de que hemos hablado, pues es un semiconductor de banda prohibida indirecta y absorbe poco la luz.
159. EN CONTRAPARTIDA, la recombinación radiactiva es, EN ÉL, débil;
160. PERO ESTO, más que ser una ventaja, es un inconveniente ya que nos hace temer que otras recombinaciones por naturaleza, van a ser dominantes.

PÁRRAFO 39

161. EN PARTICULAR hay que hacer mención de LA RECOMBINACIÓN AUGER, que es inevitable en los semiconductores de banda prohibida indirecta.
162. IMPORTA TAMBIÉN en los de banda prohibida directa como el AsGa, pero en estos casos es susceptible de reducción.
163. LA RECOMBINACIÓN AUGER consiste en la caída de un electrón en la banda de valencia -si allí encuentra un hueco-cediendo su energía a otro electrón o a otro hueco que anduvieren cerca.

164. ESTE PROCESO pone en juego tres partículas, y la probabilidad de que ocurra es proporcional a pn^2 o a np^2 ;
165. ES DECIR, sólo COBRA importancia cuando los electrones o los huecos son respectivamente muy abundantes.
166. ESTO ocurre en las regiones N^+ o en las P^+ , y también en otras regiones menos dopadas cuando, debido a la fuerte iluminación, hay muchos electrones y huecos fotogenerados.
167. Para células que no trabajan en concentración, donde no se cumple LA CONDICIÓN MENCIONADA, existe un dopaje óptimo de base (aunque su origen está sujeto a controversia) que determina cuándo esta recombinación es más favorable:
168. SE HALLA en torno a los 10^{17} átomos donadores o aceptadores por centímetro cúbico.
169. EN VIRTUD DE ELLO, el volumen de las regiones fuertemente dopadas de los emisores, con dopajes en el rango de 10^{18} - 10^{20} átomos dopantes por centímetro cúbico deben reducirse al máximo.

PÁRRAFO 40

170. PERO no es ÉSTE el único mecanismo de recombinación.
171. EL MÁS COMÚN es el descrito en 1952 por Shockley, Read y Hall, que establece que ciertas impurezas o imperfecciones en el semiconductor actúan como trampas o centros de recombinación.

172. En una región N los electrones llegan a LAS TRAMPAS, son capturados y les ceden su energía en forma de vibración (que luego se convierte en calor).
173. ESTAS TRAMPAS quedan activadas y, cuando un hueco aparece cercano, depositan allí el electrón retenido, cediendo la nueva energía del proceso en forma de vibración.
174. LA TRAMPA queda desactivada.
175. PERO SE VUELVE A ACTIVAR de inmediato.
176. La probabilidad de que ESTA RECOMBINACIÓN se produzca es proporcional, simplemente, a la densidad de huecos p.
177. POR RAZONES SIMILARES, la probabilidad de RECOMBINACIÓN en una región P es proporcional a n.
178. ESTA RECOMBINACIÓN es TAMBIÉN proporcional a la densidad de trampas;
179. rebajando ÉSTA, disminuye TAMBIÉN LA RECOMBINACIÓN.

PÁRRAFO 41

180. En el silicio de la más alta calidad disponible hoy día, ESTA RECOMBINACIÓN, en otros casos dominante, es muy baja.
181. AHORA BIEN, las superficies donde se produce una ruptura abrupta de la estructura cristalina son eficacísimas de zonas del MECANISMO DE RECOMBINACIÓN DESCRITO POR SCHOCKLEY, READ Y HALL.

182. Es verdad que recubriendo el silicio con óxido de silicio DICHA RECOMBINACIÓN se puede evitar en buena parte;
183. se habla ENTONCES de «pasivar» LA SUPERFICIE.
184. En las capas metálicas de contacto, LA RECOMBINACIÓN es altísima;
185. POR ELLO conviene reducir al máximo LA SUPERFICIE DE CONTACTO DE LOS ELECTRODOS CON EL METAL.

PÁRRAFO 42

186. Para limitar LA RECOMBINACIÓN EN LAS SUPERFICIES, EN CONTACTO O NO CON METAL, se las recubre con capas fuertemente dopadas de semiconductor, reduciendo así las densidades de portadores minoritarios-electrones en las regiones P⁺ y huecos en las N⁺- junto a las superficies.
187. Cuando hay METAL EN LA SUPERFICIE ESTA OPCIÓN es obvia y proporciona una justificación adicional de su uso para establecer contactos.
188. Si LA SUPERFICIE está cubierta de un pasivante (óxido de silicio sobre silicio) podría resultar peor el remedio que la enfermedad, al añadir la recombinación Auger de esta capa fuertemente dopada.

PÁRRAFO 43

189. Ha llegado el momento de explicar la célula PERL desarrollada por Martin Green y sus colaboradores en la Universidad de Nueva Gales del Sur.

190. A una radiación solar estándar de 0,1 watts por centímetro cuadrado (sin concentración) HA ALCANZADO un rendimiento del 24 por ciento.
191. EN ESA CÉLULA, los electrodos metálicos de delante y detrás están conectados, a través de pequeños agujeros hechos en un óxido aislante y pasivador, a regiones P⁺ en la parte posterior y N⁺ en la frontal, que no cubren la superficie entera de la célula, sino que se extienden sólo debajo de los propios agujeros de contacto.
192. EN LA SUPERFICIE FRONTAL existe, SIN EMBARGO, una fina capa N⁺, recubriéndola;
193. ESTA CAPA, capaz de limitar la recombinación de superficie, es indispensable en la célula PERL para favorecer la conducción lateral de la corriente hasta alcanzar las tiras de la rejilla de contacto que están bastante separadas.
194. ESTO es ASÍ porque la región N⁺ es bastante buena conductora de la corriente de electrones, que es la que ha de salir por los contactos frontales, lo que no sucede con la base de tipo P.
195. Todas las superficies, SALVO LOS PUNTOS DE CONTACTO, están «pasivas» con una capa de óxido de silicio.

PÁRRAFO 44

196. Quizá lo más llamativo de ESTA CÉLULA sea su compleja estructura superior, tachonada de pirámides invertidas.
197. ESTA ESTRUCTURA se consigue con relativa facilidad en el monocristal de silicio mediante un ataque químico anisotrópico.

198. Sirven ESTAS PIRÁMIDES, EN PRIMER LUGAR, para reducir la reflexión de la luz en el silicio, que desnudo y sin tratar refleja cerca del 40 por ciento de la luz incidente.
199. Cuando SE RECUBRE con una capa transparente de espesor próximo al cuarto de longitud de onda de los fotones del sol (unas 0,1 micras) actúa como las capas anti-reflectantes (AR) usadas también para gafas, y reduce la reflexión a sólo 10-15 por ciento.
200. (UN TRATAMIENTO CON DOBLE CAPA AR puede bajar la reflexión a sólo el 3-4 por ciento.)
201. En esta célula se usa el propio óxido de silicio como CAPA AR, aunque dicho material no es óptimo para TAL FUNCIÓN.
202. SIN EMBARGO, la estructura de pirámides determina que la mayoría de los rayos solares reflejados (todos, si la luz cae perpendicular) vuelven a incidir sobre otras caras de las pirámides, teniendo una nueva ocasión de penetrar EN LA CÉLULA.
203. LA REFLEXIÓN GLOBAL es del orden $0,15 \times 0,15 = 0,0225$, es decir, del 2,225 por ciento, o menos.

PÁRRAFO 45

204. LA SEGUNDA MISIÓN DE ESTA ESTRUCTURA, más sutil, se refiere al confinamiento de la luz.
205. Para conseguirLO, hemos de colocar un buen espejo en la cara posterior de LA CÉLULA.

206. Cumple ESA MISIÓN la capa metálica del electrodo posterior (plata o aluminio).
207. Se mejora ASÍ la reflectividad DE ESTA CAPA, hasta un 98 por ciento, con la capa de óxido pasivante allí colocada, a la que se debe dar un espesor bien definido, del orden de 0,1 micras.
208. DE ESTE MODO, CADA RAYO DE LUZ que entre en la célula se inclina por la refracción en las caras de las pirámides, se refleja en la cara posterior y vuelve a la cara frontal, donde muy probablemente encuentra una cara de pirámide;
209. EN ÉSTA incide con cierto ángulo.

PÁRRAFO 46

210. Cuando LA LUZ procedente de un medio ópticamente denso (de índice de refracción n elevado, 3,7 en el semiconductor) incide con cierta inclinación sobre la superficie que lo separa de un medio ópticamente menos denso (aire), experimenta una reflexión perfecta, llamada reflexión total interna.
211. ESTO es lo que ocurre a MUCHOS (¿EL 92 POR CIENTO?) DE LOS RAYOS que intentan escapar de la célula.
212. CON ESTAS CONDICIONES LOS RAYOS experimentan recorridos que en promedio (y en una estructura algo idealizada) son $4n^2$ veces el espesor de la célula (en silicio 55).
213. ASÍ, los fotones poco absorbidos, que -como hemos dicho- EN EL SILICIO son bastantes, recorren distancias suficientes para serlo, a pesar de la delgadez de la célula.

PÁRRAFO 47

214. El mayor rendimiento en concentración, PARA CÉLULAS DE SILICIO, lo ostenta hoy, con un 28 por ciento desde 1986, la estructura de célula PC («point contact») desarrollada por Dick Swanson y su equipo de la Universidad de Stanford.
215. EMPLEA refinamientos parecidos en el tratamiento óptico de las superficies.
216. Peculiar de ESTA CÉLULA es tener todos su contactos en la cara posterior, con lo cual la frontal queda libre de la malla de metalización y no sufre, por ende, la sombra que ésta arroja.

PÁRRAFO 48

217. Contra lo que suele creerse, EL TENER LOS CONTACTOS EN LA CARA POSTERIOR no constituye ningún problema, si la calidad de silicio es buena.
218. Nosotros desarrollamos en 1981 UNA CÉLULA BIFACIAL que podía ser iluminada por detrás (por la cara opuesta a la que tiene la unión PN⁺), que, con nuestras patentes, fabrica hoy la sociedad española Isofotón.
219. POR OTRA PARTE, LA CÉLULA PC ha sido la primera en utilizar el concepto de contacto puntual sobre pequeñas zonas fuertemente dopadas.

PÁRRAFO 49

220. Uno de los problemas de LAS CÉLULAS DE SILICIO EN CONCENTRACIÓN es su resistencia en serie.

221. PRODUCE pérdidas que influyen en el rendimiento.
222. DE HECHO, considerando la resistencia en serie, EL RENDIMIENTO MÁXIMO se consigue a la concentración que hace que la caída de potencial en esta resistencia sea igual a la energía térmica, a temperatura ambiente de 25 milivolts.
223. PARA CONCENTRACIONES SUPERIORES, EL RENDIMIENTO empieza a disminuir, a diferencia de lo que ocurriría con las células ideales, sin resistencia, que analizamos antes.

PÁRRAFO 50

224. LA RESISTENCIA EN SERIE se produce en diversos lugares de la célula.
225. EN LA MAYORÍA DE LOS CASOS SIN EMBARGO, con una buena técnica puede reducirse bastante: en teoría, INCLUSO INDEFINIDAMENTE.
226. SÓLO UNA COMPONENTE se muestra inevitable:
227. LA QUE produce la corriente, al atravesarla de arriba abajo.
228. EN LA CÉLULA PC, los contactos están POR DETRÁS;
229. POR TANTO, ESA COMPONENTE no existe y la resistencia en serie es bajísima.
230. GRACIAS A ELLO TRABAJA muy bien a concentraciones elevadas.
231. Se ha obtenido ASÍ el 28 % A 150 SOLES;

232. su operación A 300 SOLES parece posible, si se adelgaza LA CÉLULA hasta el punto de permitir reducir el volumen de la recombinación Auger a la que ESTA CÉLULA es muy sensible.
233. (LAS CÉLULAS DE ASGA no tienen ESE PROBLEMA, porque la movilidad de los electrones en el AsGa quintuplica la del silicio.
234. EN CONSECUENCIA, EN EL ARSENIURO DE GALIO son posibles las concentraciones de 750-1000x, y desde luego son necesarias si se quieren soluciones económicas, ya que el AsGa es más caro que el silicio).

PÁRRAFO 51

235. LAS CÉLULAS SOLARES encontrarán un futuro prometedor en su introducción dentro de cavidades confinadoras de luz.
236. ELLO LES permite tener mallas metálicas muy densas y reducir, por consiguiente, su resistencia en serie, ya que la luz reflejada puede retornar a las células.
237. ADEMÁS, EN EL CASO DE CÉLULAS HECHAS CON EL TRANSPARENTE SILICIO, la luz que, entrando en ellas, escapa sin absorber, cuenta también con la posibilidad de entrar de nuevo en ellas, aumentando el camino óptico, hasta valores quizás del orden de 500 veces el espesor de la célula.
238. Se puede fabricar ASÍ CÉLULAS MUY FINAS, con merma apreciable de la resistencia en serie.
239. Según mis cálculos, fuera de cavidad EL SILICIO alcanza, con las técnicas de confinamiento antes mencionadas, corrientes de 42 miliampères a potencias luminosas de 0,1 watts;

240. EN EL INTERIOR DE UNA CAVIDAD IDEAL, llega a los 45 miliampères.
241. Significa TODO ESTO que, usando ESTAS CAVIDADES, se lograrían rendimientos parecidos a los de la célula PC;
242. Y ELLO, CON CÉLULAS MÁS SENCILLAS Y BARATAS.
243. No se olvide, ADEMÁS, que una misma cavidad admite CÉLULAS DE VARIOS MATERIALES que potencien el rendimiento.

PÁRRAFO 52

244. Para que la luz no escape, LAS CAVIDADES necesitan, y en ello reside su problema principal, una pupila de entrada muy pequeña con concentración muy elevada.
245. Para salir al paso de ESA DIFICULTAD, he desarrollado con Juan Carlos Miñano un nuevo tipo de confinamiento de luz con sistemas ópticos especiales, en el que sólo pueden salir de la cavidad rayos poco inclinados.
246. DE ESTE MODO la pupila de entrada puede ser grande y, LA CAVIDAD, confinar la luz;
247. IMPIDE ENTONCES que escape, como si dicha entrada fuera mucho menor.
248. Basado en ESE MODELO, un consorcio adscrito al Programa JOULE de la CEE, dirigido por nuestro Instituto, y en el que se integran la Universidad de Reading, al Instituto Fraunhofer de Energía Solar de Friburgo y a la empresa CISE de Roma, está desarrollando un sistema para uso combinado de células

de AsGa y Si, que pretende superar el rendimiento máximo alcanzado con estos dos materiales, que es del 31 por ciento.

249. EL INTERÉS DEL PAR ASGA/SI reside en el bajo precio de las células del segundo material, que puede justificar la complejidad de usarlas juntamente con las de AsGa.

PÁRRAFO 53

250. RESUMIENDO, podemos decir que el aumento de rendimientos de LAS CÉLULAS SOLARES no sólo es viable, sino que cabe esperar en los próximos años valores superiores al 40 por ciento en laboratorio.
251. CON UN RENDIMIENTO DE UN 35 POR CIENTO, un metro cuadrado de módulo fotovoltaico (conjunto formado por las células y la estructura ópticas necesarias) ahorra del orden de un barril de petróleo por año.
252. Un panel de expertos reunidos por EPRI (la agrupación de investigación de las compañías eléctricas estadounidenses) en 1989, antes de la crisis del golfo Pérsico, opinaron que era muy probable que se consiguieran los costes de instalación y los rendimientos que hacen posible la producción de electricidad en centrales norteamericanas a 8 centavos de dólar por kilowatt-hora usando LA TECNOLOGÍA DE CONCENTRACIÓN CON SILICIO DE ALTO RENDIMIENTO.
253. NINGUNA OTRA TÉCNICA FOTOVOLTAICA LES pareció más idónea para alcanzar el binomio coste rendimiento requerido.
254. Sólo EXPRESARON ligeras dudas sobre el cumplimiento, por parte de la concentración, de los requisitos de fiabilidad necesarios para reducir los costes de explotación.

| | | | | | | | |
|------------------------------------|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ENCAPSULAMIENTO TÁCITO | 19 | 109 | 123 | 127 | | | |
| ANUNCIO | <i>Nombre</i> | | | | | | |
| | 10 | 15 | 49 | | | | |
| | <i>Imperativo</i> | | | | | | |
| | 40 | | | | | | |
| | <i>Adverbio</i> | | | | | | |
| | 9 | | | | | | |
| ANUNCIO CON ENCAPSULAMIENTO | <i>Marcador</i> | | | | | | |
| | 3 | 24 | 53 | 70 | 95 | 112 | 124 |
| | 15 | 36 | 54 | 72 | 100 | 120 | |
| | 18 | 44 | 59 | 73 | 102 | 121 | |
| | 19 | 47 | 68 | 78 | 106 | 123 | |

**TEXTO 2:
MICROCLUSTERS**

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ENTIDAD COINCIDENTE | <i>Expresión original</i> | | | | | | | | | |
| | 3 | 17 | 35 | 54 | 71 | 84 | 99 | 113 | 145 | 160 |
| | 7 | 18 | 36 | 58 | 74 | 85 | 100 | 114 | 152 | 161 |
| | 9 | 24 | 38 | 59 | 75 | 87 | 104 | 116 | 153 | 163 |
| | 10 | 26 | 44 | 63 | 76 | 88 | 107 | 119 | 154 | 164 |
| | 11 | 27 | 49 | 67 | 78 | 91 | 108 | 127 | 155 | 171 |
| 14 | 28 | 50 | 68 | 80 | 92 | 110 | 132 | 156 | | |
| 15 | 31 | 51 | 69 | 81 | 93 | 111 | 135 | 157 | | |
| 16 | 34 | 53 | 70 | 83 | 97 | 112 | 141 | 159 | | |
| | <i>Hiperónimo</i> | | | | | | | | | |
| | 5 | 37 | 40 | 43 | 65 | 73 | 79 | 86 | 170 | 172 |
| | <i>Sinónimo</i> | | | | | | | | | |
| | 0.1 | 41 | | | | | | | | |
| | <i>Pronombre</i> | | | | | | | | | |
| | 4 | 40 | 48 | 90 | 126 | 128 | 134 | 162 | | |
| | <i>Posesivo</i> | | | | | | | | | |
| | 0.2 | 45 | 66 | | | | | | | |
| ENTIDAD RELACIONADA | 1 | 19 | 39 | 72 | 121 | 137 | 147 | 166 | | |
| | 6 | 20 | 42 | 101 | 122 | 138 | 148 | 167 | | |
| | 8 | 21 | 54 | 102 | 130 | 143 | 151 | 168 | | |
| | 12 | 32 | 56 | 105 | 131 | 144 | 165 | 169 | | |
| ENCAPSULAMIENTO | <i>Nominalización</i> | | | | | | | | | |
| | 13 | 33 | 77 | 103 | 118 | 129 | | | | |
| | 30 | 60 | 89 | 117 | 124 | | | | | |
| | <i>Nombre</i> | | | | | | | | | |
| | 18 | 27 | 52 | 96 | 103 | 106 | 117 | 136 | 163 | |
| | 25 | 47 | 61 | 98 | 105 | 115 | 125 | 140 | | |
| <i>Pronombre</i> | | | | | | | | | | |
| | 22 | 150 | 158 | | | | | | | |
| <i>Adverbio</i> | | | | | | | | | | |
| | 20 | 82 | 112 | 133 | 142 | | | | | |

| | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ENCAPSULAMIENTO TÁCITO | 23 | 46 | 61 | 62 | 88 | 109 | 137 | 139 | 146 | 149 |
| ANUNCIO | <i>Nombre</i> | | | | | | | | | |
| | 4 | 64 | 88 | 106 | 122 | | | | | |
| | <i>Imperativo</i> | | | | | | | | | |
| | 39 | 114 | 135 | | | | | | | |
| | <i>Extraposición</i> | | | | | | | | | |
| | 52 | 80 | 86 | 87 | | | | | | |
| <i>Adverbio</i> | | | | | | | | | | |
| | 16 | 54 | 58 | 130 | 144 | 163 | | | | |
| <i>Pregunta</i> | | | | | | | | | | |
| | 5 | 6 | 7 | 8 | 108 | | | | | |
| ANUNCIO CON ENCAPSULAMIENTO | <i>Marcador</i> | | | | | | | | | |
| | 2 | 26 | 60 | 75 | 87 | 103 | 123 | 128 | 144 | 163 |
| | 14 | 32 | 61 | 80 | 96 | 111 | 125 | 138 | 148 | |
| | 21 | 48 | 68 | 86 | 100 | 117 | 126 | 142 | 156 | |

TEXTO 3:
PROGRESS IN GALLIUM ARSENIDE SEMICONDUCTORS

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ENTIDAD COINCIDENTE | <i>Expresión original</i> | | | | | | | | | |
| | 2 | 21 | 35 | 46 | 77 | 103 | 128 | 147 | 190 | 221 |
| | 3 | 22 | 36 | 47 | 84 | 104 | 130 | 149 | 203 | 223 |
| | 4 | 23 | 37 | 49 | 86 | 105 | 132 | 150 | 206 | 228 |
| | 7 | 24 | 38 | 52 | 88 | 107 | 136 | 152 | 208 | 231 |
| | 8 | 26 | 40 | 53 | 89 | 108 | 138 | 163 | 213 | 232 |
| | 9 | 29 | 41 | 55 | 93 | 109 | 139 | 171 | 215 | 233 |
| 10 | 30 | 42 | 56 | 97 | 111 | 140 | 174 | 216 | 234 | |
| 15 | 31 | 43 | 59 | 98 | 120 | 141 | 176 | 217 | 237 | |
| 16 | 32 | 44 | 65 | 99 | 123 | 142 | 179 | 219 | 238 | |
| 17 | 33 | 45 | 76 | 100 | 127 | 145 | 185 | 220 | | |
| | <i>Hiperónimo</i> | | | | | | | | | |
| 0.1 | 25 | 61 | 73 | 129 | 165 | 184 | 187 | | | |
| 5 | 28 | 62 | 92 | 164 | 170 | 186 | 189 | | | |
| | <i>Sinónimo</i> | | | | | | | | | |
| 74 | 177 | 214 | 236 | | | | | | | |
| | <i>Pronombre</i> | | | | | | | | | |
| 6 | 20 | 87 | 94 | 112 | 126 | 143 | 209 | | | |
| 14 | 75 | 91 | 96 | 124 | 137 | 161 | | | | |
| | <i>Posesivo</i> | | | | | | | | | |
| 0.2 | 79 | 131 | 212 | | | | | | | |
| | <i>Omisión</i> | | | | | | | | | |
| 113 | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ENTIDAD RELACIONADA | 1 | 39 | 70 | 90 | 119 | 152 | 167 | 191 | 201 | 226 |
| | 11 | 50 | 71 | 101 | 122 | 154 | 172 | 193 | 205 | 227 |
| | 12 | 60 | 78 | 107 | 133 | 155 | 173 | 194 | 207 | 229 |
| | 13 | 63 | 80 | 115 | 135 | 157 | 175 | 196 | 210 | 230 |
| | 18 | 64 | 82 | 116 | 145 | 158 | 178 | 198 | 211 | 239 |
| | 27 | 67 | 83 | 117 | 146 | 162 | 179 | 199 | 218 | |
| | 34 | 69 | 85 | 118 | 151 | 166 | 188 | 200 | 222 | |

| | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ENCAPSULAMIENTO | <i>Nominalización</i> | | | | | | | | | |
| | 38 | 57 | 58 | 68 | 105 | 110 | 125 | 159 | 224 | |
| | <i>Nombre</i> | | | | | | | | | |
| | 6 | 16 | 25 | 81 | 102 | 148 | 181 | 183 | 197 | 235 |
| | 13 | 19 | 48 | 95 | 106 | 180 | 182 | 192 | 204 | |
| ENCAPSULAMIENTO TÁCITO | <i>Pronombre</i> | | | | | | | | | |
| | 46 | 51 | 206 | | | | | | | |
| | <i>Adverbio</i> | | | | | | | | | |
| ANUNCIO | <i>Nombre</i> | | | | | | | | | |
| | 11 | 125 | 134 | 154 | | | | | | |
| | <i>Imperativo</i> | | | | | | | | | |
| | 47 | | | | | | | | | |
| ANUNCIO CON ENCAPSULAMIENTO | <i>Adverbio</i> | | | | | | | | | |
| | 27 | 38 | 78 | 85 | 161 | 166 | 191 | 192 | 209 | 239 |
| | <i>Marcador</i> | | | | | | | | | |
| ANUNCIO CON ENCAPSULAMIENTO | 0.2 | 15 | 48 | 82 | 94 | 131 | 157 | 198 | 225 | |
| | 12 | 37 | 52 | 84 | 119 | 133 | 168 | 216 | 230 | |
| | 13 | 43 | 54 | 88 | 126 | 144 | 176 | 221 | | |
| | 14 | 44 | 67 | 92 | 127 | 153 | 193 | 222 | | |

**TEXTO 4:
THE SILICON RETINA**

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------|-----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|
| ENTIDAD COINCIDENTE | <i>Expresión original</i> | | | | | | | | | |
| | 1 | 15 | 22 | 28 | 41 | 58 | 65 | 78 | 90 | 112 |
| | 3 | 16 | 23 | 29 | 42 | 60 | 70 | 79 | 95 | 130 |
| | 6 | 18 | 24 | 31 | 49 | 62 | 72 | 82 | 100 | 132 |
| | 8 | 20 | 26 | 34 | 54 | 63 | 73 | 83 | 109 | 137 |
| | 11 | 21 | 27 | 38 | 56 | 64 | 75 | 89 | 111 | 143 |
| | <i>Hiperónimo</i> | | | | | | | | | |
| | 114 | 135 | | | | | | | | |
| | <i>Sinónimo</i> | | | | | | | | | |
| | 4 | 35 | 55 | 80 | 81 | 92 | | | | |
| | <i>Pronombre</i> | | | | | | | | | |
| | 2 | 14 | 40 | 74 | 110 | 145 | | | | |
| | 7 | 25 | 44 | 108 | 113 | | | | | |
| | <i>Posesivo</i> | | | | | | | | | |
| | 37 | 98 | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | |
|--------------------------------|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
| ENTIDAD RELACIONADA | 0 | 39 | 51 | 67 | 88 | 97 | 115 | 126 | 140 |
| | 9 | 45 | 52 | 68 | 91 | 99 | 122 | 129 | |
| | 19 | 48 | 53 | 76 | 93 | 101 | 123 | 133 | |
| | 33 | 49 | 61 | 84 | 94 | 104 | 124 | 134 | |
| | 36 | 50 | 66 | 86 | 96 | 106 | 125 | 139 | |

| | | | | | | | | | |
|------------------------|-----------------------|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| ENCAPSULAMIENTO | <i>Nominalización</i> | | | | | | | | |
| | 10 | 30 | 43 | 116 | 138 | | | | |
| | <i>Nombre</i> | | | | | | | | |
| | 5 | 8 | 12 | 17 | 31 | 118 | 128 | 144 | |
| | <i>Pronombre</i> | | | | | | | | |
| | 59 | 131 | | | | | | | |

| | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|----|----|----|-----|-----|-----|--|--|--|
| ENCAPSULAMIENTO TÁCITO | 24 | 71 | 85 | 107 | 121 | 127 | | | |
|-----------------------------------|----|----|----|-----|-----|-----|--|--|--|

| | | | | | | | | | | |
|--|----------------------|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
| ANUNCIO | <i>Nombre</i> | | | | | | | | | |
| | 130 | | | | | | | | | |
| | <i>Adverbio</i> | | | | | | | | | |
| | 9 14 135 | | | | | | | | | |
| ANUNCIO CON ENCAPSULAMIENTO | <i>Extraposición</i> | | | | | | | | | |
| | 119 | | | | | | | | | |
| | <i>Pregunta</i> | | | | | | | | | |
| 18 | | | | | | | | | | |
| ANUNCIO CON ENCAPSULAMIENTO | <i>Marcador</i> | | | | | | | | | |
| | 2 | 22 | 41 | 64 | 76 | 83 | 102 | 113 | 124 | 139 |
| | 6 | 23 | 44 | 65 | 78 | 91 | 107 | 115 | 126 | 140 |
| | 7 | 34 | 46 | 68 | 79 | 97 | 110 | 120 | 129 | 143 |
| | 15 | 39 | 59 | 72 | 81 | 99 | 111 | 122 | 138 | |

**TEXTO 5:
MICROLASERS**

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------|-----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|-----|
| ENTIDAD COINCIDENTE | <i>Expresión original</i> | | | | | | | | | |
| | 6 | 21 | 35 | 54 | 63 | 72 | 80 | 91 | 112 | 124 |
| | 9 | 22 | 36 | 56 | 64 | 73 | 83 | 99 | 113 | 127 |
| | 10 | 23 | 37 | 57 | 67 | 74 | 87 | 104 | 119 | 129 |
| | 14 | 25 | 38 | 58 | 69 | 75 | 88 | 106 | 120 | 132 |
| | 19 | 29 | 51 | 59 | 70 | 77 | 89 | 107 | 122 | 133 |
| | 20 | 31 | 52 | 62 | 71 | 79 | 90 | 110 | 123 | 136 |
| | <i>Hiperónimo</i> | | | | | | | | | |
| | 11 | 16 | 105 | 115 | 135 | | | | | |
| | <i>Sinónimo</i> | | | | | | | | | |
| | 66 | 116 | 117 | | | | | | | |
| | <i>Pronombre</i> | | | | | | | | | |
| | 15 | 77 | 81 | | | | | | | |

| | | | | | | | | | |
|--------------------------------|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| ENTIDAD RELACIONADA | 1 | 18 | 32 | 41 | 60 | 79 | 98 | 111 | 131 |
| | 2 | 24 | 33 | 45 | 65 | 84 | 100 | 114 | 134 |
| | 5 | 26 | 34 | 50 | 71 | 90 | 101 | 118 | |
| | 8 | 28 | 39 | 53 | 76 | 92 | 102 | 128 | |
| | 13 | 30 | 40 | 55 | 78 | 97 | 108 | 130 | |

| | | | | | | | | | | |
|------------------------|-----------------------|----|----|----|-----|-----|----|----|----|-----|
| ENCAPSULAMIENTO | <i>Nominalización</i> | | | | | | | | | |
| | 4 | 42 | 47 | 82 | 85 | 86 | 93 | 94 | 95 | 125 |
| | <i>Nombre</i> | | | | | | | | | |
| | 3 | 17 | 42 | 44 | 48 | 115 | | | | |
| | 7 | 27 | 43 | 46 | 103 | | | | | |
| | <i>Pronombre</i> | | | | | | | | | |
| | 61 | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ENCAPSULAMIENTO TÁCITO | 19 | 49 | 68 | 78 | 96 | 101 | 109 | 119 | 121 | 126 |
|-----------------------------------|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|

| | | | | | | | | | | |
|--|----------------------|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ANUNCIO | <i>Nombre</i> | | | | | | | | | |
| | 12 | 39 | 61 | 110 | | | | | | |
| | <i>Imperativo</i> | | | | | | | | | |
| | 22 | 108 | | | | | | | | |
| | <i>Extraposición</i> | | | | | | | | | |
| | 131 | 134 | | | | | | | | |
| | <i>Adverbio</i> | | | | | | | | | |
| | 12 | 19 | 64 | 84 | 118 | 141 | 143 | | | |
| | <i>Pregunta</i> | | | | | | | | | |
| | 60 | 124 | | | | | | | | |
| ANUNCIO CON ENCAPSULAMIENTO | <i>Marcador</i> | | | | | | | | | |
| | 4 | 38 | 58 | 72 | 84 | 92 | 104 | 111 | 126 | 144 |
| | 21 | 48 | 70 | 79 | 85 | 94 | 106 | 121 | 131 | |
| | 23 | 51 | 71 | 81 | 89 | 101 | 109 | 123 | 134 | |

**TEXTO 6:
SINGLE ELECTRONICS**

| | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|---------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ENTIDAD COINCIDENTE | <i>Expresión original</i> | | | | | | | | | |
| | 3 | 20 | 42 | 53 | 71 | 106 | 123 | 138 | 149 | 174 |
| | 4 | 21 | 43 | 56 | 91 | 107 | 124 | 139 | 150 | 182 |
| | 5 | 23 | 45 | 58 | 95 | 111 | 125 | 140 | 152 | 188 |
| | 10 | 25 | 46 | 59 | 96 | 114 | 129 | 141 | 158 | 191 |
| | 11 | 35 | 47 | 60 | 100 | 116 | 132 | 142 | 163 | 194 |
| | 13 | 39 | 51 | 61 | 103 | 117 | 135 | 145 | 169 | |
| | 15 | 41 | 52 | 64 | 104 | 118 | 136 | 147 | 173 | |
| | <i>Hiperónimo</i> | | | | | | | | | |
| | 65 | 92 | 108 | 128 | 162 | 172 | | | | |
| | 70 | 105 | 127 | 160 | 170 | 183 | | | | |
| | <i>Sinónimo</i> | | | | | | | | | |
| | 12 | 193 | | | | | | | | |
| | <i>Pronombre</i> | | | | | | | | | |
| | 9 | 22 | 33 | 154 | 178 | 198 | | | | |
| | 18 | 30 | 153 | 176 | 192 | | | | | |
| ENTIDAD RELACIONADA | 0.1 | 21 | 31 | 53 | 89 | 122 | 143 | 164 | 175 | |
| | 1 | 24 | 36 | 65 | 94 | 130 | 146 | 165 | 185 | |
| | 6 | 26 | 48 | 66 | 102 | 131 | 148 | 167 | 189 | |
| | 16 | 27 | 49 | 67 | 113 | 133 | 156 | 168 | | |
| | 19 | 28 | 50 | 69 | 115 | 134 | 161 | 169 | | |
| ENCAPSULAMIENTO | <i>Nominalización</i> | | | | | | | | | |
| | 34 | 40 | 63 | 93 | 97 | 121 | 144 | 180 | 185 | |
| | <i>Nombre</i> | | | | | | | | | |
| | 0.2 | 32 | 55 | 68 | 101 | 126 | 155 | 179 | 195 | |
| | 7 | 37 | 57 | 88 | 109 | 137 | 166 | 181 | | |
| | 14 | 38 | 58 | 98 | 110 | 150 | 170 | 184 | | |
| | 29 | 44 | 62 | 99 | 116 | 152 | 177 | 190 | | |
| | <i>Pronombre</i> | | | | | | | | | |
| | 171 | 199 | | | | | | | | |
| ENCAPSULAMIENTO TÁCITO | 2 | 31 | 79 | 120 | 144 | 189 | 196 | | | |
| | 8 | 57 | 86 | 124 | 187 | 191 | | | | |

| | | | | | | | | | | |
|--|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| ANUNCIO | <i>Nombre</i> | | | | | | | | | |
| | 86 | 187 | | | | | | | | |
| | <i>Imperativo</i> | | | | | | | | | |
| | 72 | | | | | | | | | |
| | <i>Extraposición</i> | | | | | | | | | |
| | 6 | | | | | | | | | |
| ANUNCIO CON ENCAPSULAMIENTO | <i>Marcador</i> | | | | | | | | | |
| | 8 | 45 | 66 | 81 | 104 | 133 | 147 | 164 | 180 | |
| | 20 | 52 | 67 | 82 | 108 | 135 | 149 | 167 | 188 | |
| | 22 | 60 | 69 | 85 | 113 | 136 | 158 | 173 | | |
| | 25 | 61 | 71 | 92 | 122 | 141 | 160 | 175 | | |
| 31 | 62 | 75 | 102 | 129 | 143 | 162 | 176 | | | |

**TEXTO 7:
LA FÍSICA DE SUPERFICIES**

| | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ENTIDAD COINCIDENTE | <i>Expresión original</i> | | | | | | | | | | |
| | 0 | 14 | 30 | 46 | 70 | 87 | 108 | 141 | 158 | 176 | |
| | 1 | 15 | 33 | 49 | 72 | 90 | 111 | 143 | 159 | 177 | |
| | 2 | 19 | 38 | 51 | 74 | 93 | 121 | 146 | 165 | 178 | |
| | 5 | 20 | 39 | 54 | 75 | 99 | 126 | 147 | 167 | 179 | |
| | 8 | 21 | 42 | 60 | 76 | 102 | 134 | 150 | 168 | | |
| | 10 | 28 | 43 | 65 | 78 | 104 | 135 | 152 | 173 | | |
| | 12 | 29 | 45 | 66 | 81 | 105 | 136 | 154 | 174 | | |
| | <i>Hiperónimo</i> | | | | | | | | | | |
| | 94 | 145 | | | | | | | | | |
| | <i>Sinónimo</i> | | | | | | | | | | |
| | 36 | 69 | 89 | 160 | | | | | | | |
| | <i>Pronombre</i> | | | | | | | | | | |
| | 23 | 58 | 73 | 107 | 110 | 112 | 145 | 180 | | | |
| | <i>Posesivo</i> | | | | | | | | | | |
| | 22 | 123 | | | | | | | | | |
| | <i>Omisión</i> | | | | | | | | | | |
| | 18 | 37 | 77 | 118 | 184 | | | | | | |
| ENTIDAD RELACIONADA | 6 | 27 | 61 | 97 | 115 | 129 | 144 | 175 | | | |
| | 7 | 41 | 66 | 100 | 116 | 130 | 155 | 186 | | | |
| | 11 | 48 | 79 | 101 | 122 | 131 | 157 | | | | |
| | 25 | 56 | 82 | 106 | 126 | 137 | 163 | | | | |
| | 26 | 57 | 95 | 113 | 128 | 138 | 172 | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| ENCAPSULAMIENTO | <i>Nominalización</i> | | | | | | | | | | |
| | 53 | 64 | 84 | 153 | | | | | | | |
| | <i>Nombre</i> | | | | | | | | | | |
| | 3 | 13 | 32 | 61 | 86 | 114 | 125 | 149 | 168 | 177 | 183 |
| | 4 | 17 | 47 | 71 | 88 | 117 | 139 | 151 | 169 | 188 | |
| | 12 | 30 | 55 | 80 | 98 | 119 | 142 | 161 | 170 | 182 | |
| | <i>Pronombre</i> | | | | | | | | | | |
| 24 | 50 | 59 | 67 | 91 | 96 | 132 | 164 | | | | |
| 44 | 52 | 62 | 85 | 92 | 124 | 148 | 181 | | | | |
| | <i>Adverbio</i> | | | | | | | | | | |
| 10 | 26 | 43 | 79 | 140 | 155 | | | | | | |

| | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ENCAPSULAMIENTO TÁCITO | 120 | 159 | 166 | | | | | | | |
| ANUNCIO | <i>Nombre</i> | | | | | | | | | |
| | 6 | 8 | 15 | 57 | 156 | 161 | | | | |
| | <i>Imperativo</i> | | | | | | | | | |
| | 19 | 65 | 133 | 138 | 149 | 165 | | | | |
| ANUNCIO CON ENCAPSULAMIENTO | <i>Adverbio</i> | | | | | | | | | |
| | 41 | 63 | 149 | 185 | | | | | | |
| ANUNCIO CON ENCAPSULAMIENTO | <i>Pregunta</i> | | | | | | | | | |
| | 33 | 49 | 108 | | | | | | | |
| | <i>Marcador</i> | | | | | | | | | |
| | 4 | 21 | 40 | 51 | 71 | 105 | 120 | 123 | 160 | 179 |
| | 18 | 27 | 42 | 54 | 90 | 108 | 121 | 134 | 162 | |
| | 20 | 33 | 48 | 56 | 97 | 113 | 122 | 153 | 163 | |

**TEXTO 8:
TRANSICIONES DE FASE EN LAS PEROVSKITAS**

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ENTIDAD COINCIDENTE | <i>Expresión original</i> | | | | | | | | | |
| | 1 | 19 | 48 | 59 | 76 | 97 | 123 | 135 | 158 | 186 |
| | 2 | 22 | 49 | 63 | 79 | 101 | 124 | 136 | 161 | |
| | 3 | 24 | 52 | 64 | 82 | 105 | 125 | 141 | 163 | |
| | 5 | 30 | 53 | 65 | 90 | 107 | 126 | 143 | 164 | |
| | 11 | 37 | 54 | 66 | 92 | 110 | 127 | 148 | 167 | |
| | 13 | 38 | 56 | 69 | 94 | 112 | 128 | 155 | 170 | |
| 14 | 44 | 57 | 73 | 96 | 122 | 132 | 157 | 171 | | |
| ENTIDAD RELACIONADA | <i>Hiperónimo</i> | | | | | | | | | |
| | 0 | 6 | 29 | 83 | 156 | 169 | | | | |
| | 2 | 7 | 70 | 140 | 160 | | | | | |
| | <i>Sinónimo</i> | | | | | | | | | |
| | 27 | 40 | 68 | 78 | | | | | | |
| | <i>Pronombre</i> | | | | | | | | | |
| | 104 | 106 | 139 | 147 | 154 | | | | | |
| ENCAPSULAMIENTO | <i>Posesivo</i> | | | | | | | | | |
| | 61 | 146 | 179 | | | | | | | |
| | <i>Omisión</i> | | | | | | | | | |
| | 35 | 91 | 149 | | | | | | | |
| <i>Nominalización</i> | | | | | | | | | | |
| 33 | 98 | 108 | 117 | 118 | 134 | | | | | |
| <i>Nombre</i> | | | | | | | | | | |
| 12 | 43 | 55 | 113 | 129 | 157 | 174 | 182 | 187 | | |
| 22 | 46 | 58 | 119 | 153 | 166 | 175 | 184 | | | |
| <i>Pronombre</i> | | | | | | | | | | |
| 24 | 35 | 41 | 71 | 81 | 104 | 118 | 169 | 177 | | |
| <i>Adverbio</i> | | | | | | | | | | |
| 19 | 74 | 137 | 180 | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | |
|--|-------------------|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| ANUNCIO | <i>Nombre</i> | | | | | | | | | |
| | 1 | 49 | 52 | | | | | | | |
| | <i>Imperativo</i> | | | | | | | | | |
| | 17 | 25 | 111 | | | | | | | |
| | <i>Adverbio</i> | | | | | | | | | |
| | 115 | 173 | | | | | | | | |
| ANUNCIO CON ENCAPSULAMIENTO | <i>Marcador</i> | | | | | | | | | |
| | 4 | 20 | 41 | 66 | 90 | 106 | 117 | 133 | 155 | |
| | 9 | 22 | 50 | 70 | 99 | 109 | 128 | 136 | 168 | |
| | 12 | 40 | 51 | 84 | 102 | 113 | 131 | 150 | 185 | |

**TEXTO 9:
PROPIEDADES DE LOS MICROAGREGADOS METÁLICOS**

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ENTIDAD COINCIDENTE | <i>Expresión original</i> | | | | | | | | | |
| | 0 | 10 | 34 | 50 | 82 | 108 | 129 | 153 | 170 | 191 |
| | 1 | 12 | 35 | 60 | 89 | 111 | 136 | 163 | 171 | 196 |
| | 3 | 14 | 36 | 67 | 93 | 121 | 140 | 165 | 172 | 197 |
| | 5 | 28 | 38 | 72 | 102 | 122 | 141 | 166 | 178 | |
| | 7 | 29 | 40 | 73 | 103 | 124 | 148 | 167 | 180 | |
| 8 | 30 | 47 | 81 | 106 | 128 | 149 | 168 | 182 | | |
| | <i>Hiperónimo</i> | | | | | | | | | |
| | 8 | 44 | 50 | 61 | 109 | | | | | |
| | <i>Sinónimo</i> | | | | | | | | | |
| | 1 | 13 | 20 | 42 | 54 | 62 | 80 | 95 | | |
| | <i>Pronombre</i> | | | | | | | | | |
| | 2 | 18 | 78 | 147 | 192 | | | | | |
| | <i>Posesivo</i> | | | | | | | | | |
| | 134 | 162 | | | | | | | | |
| | <i>Omisión</i> | | | | | | | | | |
| | 77 | 87 | 105 | 117 | 134 | 154 | 161 | | | |
| ENTIDAD RELACIONADA | 6 | 22 | 46 | 65 | 90 | 112 | 125 | 138 | 170 | 184 |
| | 11 | 32 | 48 | 66 | 91 | 113 | 126 | 142 | 172 | 190 |
| | 12 | 33 | 49 | 68 | 92 | 115 | 127 | 143 | 173 | 193 |
| | 15 | 34 | 55 | 70 | 99 | 116 | 131 | 152 | 174 | 195 |
| | 16 | 37 | 58 | 75 | 100 | 117 | 132 | 158 | 176 | 198 |
| | 17 | 40 | 61 | 76 | 109 | 120 | 133 | 159 | 181 | 199 |
| | 19 | 41 | 64 | 83 | 111 | 123 | 137 | 160 | 183 | |
| | | | | | | | | | | |
| ENCAPSULAMIENTO | <i>Nominalización</i> | | | | | | | | | |
| | 16 | 21 | 22 | 143 | 193 | | | | | |
| | <i>Nombre</i> | | | | | | | | | |
| | 4 | 16 | 28 | 51 | 56 | 94 | 151 | 157 | 194 | |
| | 7 | 26 | 29 | 53 | 84 | 115 | 155 | 169 | | |
| | <i>Pronombre</i> | | | | | | | | | |
| | 59 | 98 | 152 | 177 | 186 | 198 | | | | |
| | <i>Adverbio</i> | | | | | | | | | |
| | 24 | 60 | 127 | 136 | | | | | | |

| | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ENCAPSULAMIENTO TÁCITO | 119 | 150 | 156 | 184 | 185 | 188 | 197 | | | |
| ANUNCIO | <i>Nombre</i> | | | | | | | | | |
| | 4 | 159 | 163 | 182 | 188 | | | | | |
| | <i>Adverbio</i> | | | | | | | | | |
| | 52 | 76 | 82 | 151 | | | | | | |
| | <i>Imperativo</i> | | | | | | | | | |
| | 8 | 82 | 132 | | | | | | | |
| <i>Extraposición</i> | | | | | | | | | | |
| | 48 | 89 | 110 | 175 | 176 | | | | | |
| <i>Pregunta</i> | | | | | | | | | | |
| | 5 | 6 | 134 | 154 | | | | | | |
| ANUNCIO CON ENCAPSULAMIENTO | <i>Marcador</i> | | | | | | | | | |
| | 2 | 27 | 71 | 92 | 108 | 138 | 149 | 174 | 183 | 199 |
| | 9 | 32 | 73 | 96 | 113 | 139 | 161 | 176 | 186 | |
| | 12 | 65 | 74 | 97 | 132 | 147 | 171 | 178 | 187 | |
| | 16 | 66 | 89 | 103 | 133 | 148 | 172 | 179 | 194 | |

**TEXTO 10:
SINGULARIDADES EN RELATIVIDAD GENERAL**

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ENTIDAD COINCIDENTE | <i>Expresión original</i> | | | | | | | | | |
| | 0.1 | 26 | 49 | 66 | 95 | 128 | 144 | 166 | 195 | 223 |
| | 1 | 27 | 51 | 69 | 96 | 130 | 152 | 169 | 199 | 224 |
| | 13 | 29 | 54 | 72 | 105 | 131 | 153 | 172 | 200 | 226 |
| | 16 | 31 | 56 | 73 | 109 | 132 | 154 | 177 | 203 | 228 |
| | 18 | 35 | 57 | 87 | 113 | 139 | 155 | 179 | 204 | 236 |
| | 20 | 38 | 58 | 88 | 118 | 140 | 161 | 182 | 207 | |
| 22 | 44 | 59 | 91 | 123 | 141 | 163 | 183 | 213 | | |
| 25 | 48 | 65 | 94 | 127 | 143 | 164 | 189 | 217 | | |
| | <i>Hiperónimo</i> | | | | | | | | | |
| | 80 | 82 | 102 | | | | | | | |
| | <i>Sinónimo</i> | | | | | | | | | |
| | 120 | 197 | | | | | | | | |
| | <i>Pronombre</i> | | | | | | | | | |
| | 2 | 10 | 21 | 50 | 79 | 126 | 171 | | | |
| | 5 | 12 | 34 | 71 | 93 | 168 | 248 | | | |
| | <i>Posesivo</i> | | | | | | | | | |
| | 37 | 70 | 78 | 88 | 108 | 186 | | | | |
| | <i>Omisión</i> | | | | | | | | | |
| | 3 | 24 | 151 | 159 | 164 | 215 | 244 | | | |
| | 7 | 150 | 158 | 162 | 193 | 216 | | | | |
| ENTIDAD RELACIONADA | 4 | 39 | 61 | 99 | 115 | 145 | 175 | 192 | 242 | |
| | 9 | 45 | 63 | 100 | 117 | 150 | 178 | 196 | 243 | |
| | 11 | 46 | 75 | 102 | 124 | 151 | 180 | 206 | 245 | |
| | 15 | 47 | 77 | 103 | 128 | 160 | 181 | 214 | 246 | |
| | 17 | 55 | 80 | 107 | 133 | 167 | 185 | 231 | | |
| | 19 | 60 | 98 | 110 | 136 | 170 | 191 | 238 | | |
| | | | | | | | | | | |
| ENCAPSULAMIENTO | <i>Nominalización</i> | | | | | | | | | |
| | 8 | 14 | 53 | 148 | 186 | 210 | 227 | | | |
| | <i>Nombre</i> | | | | | | | | | |
| | 0.2 | 52 | 83 | 106 | 137 | 156 | 198 | 211 | 225 | 237 |
| | 32 | 64 | 85 | 116 | 142 | 157 | 201 | 215 | 229 | 240 |
| | 36 | 67 | 92 | 119 | 146 | 159 | 205 | 218 | 232 | 245 |
| | 40 | 74 | 96 | 121 | 147 | 190 | 209 | 220 | 233 | 247 |
| 43 | 76 | 104 | 134 | 152 | 194 | 210 | 221 | 234 | 249 | |
| | <i>Pronombre</i> | | | | | | | | | |
| 6 | 28 | 38 | 89 | 111 | 174 | 208 | 222 | | | |
| 23 | 33 | 62 | 103 | 122 | 207 | 219 | 224 | | | |
| | <i>Adverbio</i> | | | | | | | | | |
| 34 | 95 | 97 | 101 | 174 | 182 | | | | | |

| | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| ENCAPSULAMIENTO TÁCITO | 149 | 159 | 184 | | | | | | | |
| ANUNCIO | <i>Nombre</i> | | | | | | | | | |
| | 32 | 42 | 157 | 169 | 192 | 236 | 241 | | | |
| | 40 | 73 | 166 | 188 | 209 | 237 | | | | |
| | <i>Nominalización</i> | | | | | | | | | |
| | 214 | 230 | | | | | | | | |
| | <i>Imperativo</i> | | | | | | | | | |
| | 25 | 47 | 49 | 76 | | | | | | |
| <i>Extraposición</i> | | | | | | | | | | |
| 46 | 56 | 59 | 61 | 206 | | | | | | |
| <i>Adverbio</i> | | | | | | | | | | |
| 49 | 55 | 61 | 76 | 81 | 84 | 238 | | | | |
| <i>Pregunta</i> | | | | | | | | | | |
| 22 | 148 | 203 | 217 | 228 | 242 | 243 | 244 | 245 | 246 | |
| ANUNCIO CON ENCAPSULAMIENTO | <i>Marcador</i> | | | | | | | | | |
| | 0.2 | 15 | 45 | 95 | 136 | 151 | 174 | 191 | 226 | |
| | 6 | 17 | 53 | 96 | 137 | 154 | 182 | 202 | 248 | |
| | 8 | 22 | 63 | 98 | 138 | 158 | 183 | 203 | | |
| | 9 | 30 | 68 | 129 | 143 | 159 | 186 | 208 | | |
| | 11 | 31 | 80 | 130 | 150 | 169 | 189 | 219 | | |

| | | | | | | | | | |
|--|-------------------|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ENCAPSULAMIENTO TÁCITO | 8 | 29 | 37 | 53 | 93 | 135 | 152 | | |
| | 15 | 35 | 50 | 78 | 113 | 141 | 167 | | |
| ANUNCIO | <i>Nombre</i> | | | | | | | | |
| | 25 | 53 | 61 | 92 | 97 | 98 | 138 | 161 | 163 |
| | <i>Imperativo</i> | | | | | | | | |
| | 65 | 86 | | | | | | | |
| ANUNCIO CON ENCAPSULAMIENTO | <i>Marcador</i> | | | | | | | | |
| | 3 | 7 | 26 | 38 | 65 | 83 | 89 | 125 | 175 |
| | 5 | 18 | 27 | 43 | 68 | 87 | 91 | 164 | 177 |
| | 6 | 23 | 28 | 58 | 72 | 88 | 103 | 170 | 179 |

**TEXTO 12:
CÉLULAS SOLARES MUY EFICIENTES**

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ENTIDAD COINCIDENTE | <i>Expresión original</i> | | | | | | | | | |
| | 0 | 28 | 48 | 69 | 90 | 125 | 144 | 182 | 213 | 250 |
| | 15 | 32 | 50 | 71 | 94 | 126 | 145 | 186 | 214 | 251 |
| | 16 | 33 | 56 | 73 | 97 | 127 | 153 | 188 | 216 | |
| | 18 | 34 | 57 | 74 | 98 | 129 | 158 | 191 | 222 | |
| | 19 | 35 | 58 | 75 | 101 | 131 | 161 | 192 | 223 | |
| | 20 | 37 | 61 | 78 | 106 | 134 | 163 | 193 | 224 | |
| 21 | 41 | 64 | 79 | 107 | 135 | 172 | 196 | 228 | | |
| 22 | 42 | 65 | 80 | 112 | 136 | 173 | 197 | 229 | | |
| 23 | 43 | 66 | 83 | 115 | 138 | 174 | 201 | 234 | | |
| 25 | 44 | 67 | 86 | 117 | 140 | 176 | 202 | 237 | | |
| 27 | 45 | 68 | 88 | 121 | 143 | 180 | 210 | 244 | | |
| | <i>Hiperónimo</i> | | | | | | | | | |
| | 8 | 49 | 59 | 72 | 92 | 147 | 154 | 156 | | |
| | <i>Sinónimo</i> | | | | | | | | | |
| | 2 | 110 | | | | | | | | |
| | <i>Pronombre</i> | | | | | | | | | |
| | 5 | 24 | 60 | 133 | 155 | 209 | 236 | | | |
| | 10 | 38 | 130 | 149 | 179 | 227 | | | | |
| | <i>Posesivo</i> | | | | | | | | | |
| | 29 | 232 | | | | | | | | |
| | <i>Omisión</i> | | | | | | | | | |
| | 9 | 39 | 93 | 142 | 168 | 190 | 215 | 230 | | |
| | 17 | 40 | 120 | 162 | 171 | 199 | 221 | 240 | | |
| | 26 | 46 | 128 | 165 | 175 | 209 | 226 | 254 | | |
| ENTIDAD RELACIONADA | 1 | 30 | 54 | 85 | 104 | 183 | 218 | 238 | 252 | |
| | 3 | 31 | 62 | 95 | 114 | 184 | 219 | 239 | 253 | |
| | 4 | 36 | 76 | 96 | 129 | 195 | 220 | 240 | | |
| | 6 | 51 | 77 | 99 | 150 | 198 | 226 | 242 | | |
| | 13 | 53 | 81 | 100 | 181 | 208 | 235 | 243 | | |
| | | | | | | | | | | |
| ENCAPSULAMIENTO | <i>Nominalización</i> | | | | | | | | | |
| | 11 | 132 | 200 | | | | | | | |
| | <i>Nombre</i> | | | | | | | | | |
| | 52 | 103 | 116 | 122 | 152 | 164 | 187 | 208 | 245 | 248 |
| | 102 | 111 | 119 | 151 | 157 | 167 | 206 | 212 | 246 | |
| <i>Pronombre</i> | | | | | | | | | | |
| 49 | 82 | 136 | 166 | 170 | 194 | 211 | 236 | 242 | | |
| 55 | 108 | 146 | 169 | 185 | 205 | 230 | 241 | | | |
| <i>Adverbio</i> | | | | | | | | | | |
| 28 | 97 | 124 | 183 | 194 | 207 | 213 | 238 | 247 | | |

| | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ENCAPSULAMIENTO TÁCITO | 7 | 45 | 70 | 89 | 122 | 152 | 177 | 204 | 225 | 250 |
| ANUNCIO | <i>Nombre</i> | | | | | | | | | |
| | 25 | 72 | 108 | 147 | 157 | | | | | |
| | <i>Nominalización</i> | | | | | | | | | |
| | 217 | | | | | | | | | |
| | <i>Imperativo</i> | | | | | | | | | |
| | 243 | | | | | | | | | |
| ANUNCIO CON ENCAPSULAMIENTO | <i>Extraposición</i> | | | | | | | | | |
| | 64 | 141 | 182 | 189 | | | | | | |
| | <i>Adverbio</i> | | | | | | | | | |
| | 6 | 9 | 10 | 20 | 53 | 97 | 196 | | | |
| | <i>Pregunta</i> | | | | | | | | | |
| | 58 | 75 | 98 | 156 | | | | | | |
| ANUNCIO CON ENCAPSULAMIENTO | <i>Marcador</i> | | | | | | | | | |
| | 8 | 56 | 75 | 99 | 125 | 160 | 178 | 219 | 237 | |
| | 10 | 63 | 79 | 101 | 128 | 162 | 179 | 222 | 243 | |
| | 22 | 65 | 83 | 112 | 137 | 165 | 181 | 225 | | |
| | 34 | 67 | 95 | 114 | 144 | 170 | 192 | 229 | | |
| | 40 | 69 | 96 | 118 | 159 | 175 | 198 | 234 | | |