LA GRAN ILUSIÓN I. EL MONOPOLO MAGNÉTICO

Autor: JORGE FLORES VALDÉS

- COMITÉ DE SELECCIÓN
- EDICIONES
- DEDICATORIA
- PREFACIO

- NOTA INTRODUCTORIA
- I. UNA FAMILIA DE FÍSICOS
- II. EL EXPERIMENTO DE CABRERA
- III. LA BÚSQUEDA ANTERIOR
- IV. EL GRAN PAUL ADRIEN MAURICE DIRAC
- V. DIRAC Y EL MONOPOLO MAGNÉTICO
- VI. UN PUNTO DE VISTA SOBRE LA FÍSICA TEÓRICA
- VII. LA BALANZA DE TORSIÓN
- VIII. CARGAS EN MOVIMIENTO
- IX. UN ABSOLUTO POR OTRO
- X. EL CAMPO MAGNÉTICO
- XI. MAXWELL, UN GENIO SINTÉTICO
- XII. LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS
- XIII. LA LUZ Y LA ESTRUCTURA DE LA MATERIA
- XIV. EVOLUCIÓN DE LA TEORÍA CUÁNTICA
- XV. TERMODINÁMICA Y MECÁNICA ESTADÍSTICA
- XVI. PLANCK Y LA CATÁSTROFE ULTRAVIOLETA
- XVII. EINSTEIN Y EL EFECTO FOTOELÉCTRICO
- XVIII. EL ÁTOMO DE BOHR

- XIX. LA DUALIDAD PARTÍCULA-ONDA
- XX. LA MECÁNICA CUÁNTICA
- XXI. SOBRE ÁTOMOS, MONTAÑAS Y ESTRELLAS
- XXII. UN ESTUDIO EN FÍSICA CUALITATIVA
- XXIII. A MANERA DE RESUMEN
- XXIV. EL MONOPOLO MAGNÉTICO DE DIRAC
- XXV. LAS PROPIEDADES DEL MONOPOLO MAGNÉTICO
- XXVI. LAS CAMPANAS SE ECHAN A VUELO
- XXVII. EL MONOPOLO SUPERPESADO
- XXVIII. LA COSMOLOGÍA Y EL MONOPOLO
- XXIX. LOS NUEVOS EXPERIMENTOS
- XXX. LA SUPERCONDUCTIVIDAD Y LOS MONOPOLOS
- XXXI. UN EXPERIMENTO CUIDADOSO
- EPÍLOGO
- COLOFÓN
- CONTRAPORTADA

COMITÉ DE SELECCIÓN

Dr. Antonio Alonso

Dr. Gerardo Cabañas

Dr. Juan Ramón de la Fuente

Dr. Jorge Flores Valdés

Dr. Leopoldo García-Colín Scherer

Dr. Tomás Garza

Dr. Gonzalo Halffter

Dr. Raúl Herrera

Dr. Jaime Martuscelli

Dr. Héctor Nava Jaimes

Dr. Manuel Peimbert

Dr. Juan José Rivaud

Dr. Julio Rubio Oca

Dr. José Sarukhán

Dr. Guillermo Soberón

Coordinadora:

María del Carmen Farías

Indice

EDICIONES

la

ciencia/11

para todos

Primera edición (La ciencia desde México),1986

Primera reimpresión, 1995

Segunda edición (La ciencia para Todos),1997

La ciencia para Todos es proyecto y propiedad del Fondo de Cultura Económica, al que pertenecen también sus derechos. Se publica con los auspicios de la Secretaría de Educación Pública y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

D.R. © 1986 FONDO DE CULTURA ECONÓMICA, S. A. DE C. V.

D.R. © 1997 FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

Carretera Picacho-Ajusco 227, 14200 México, D.F.

ISBN 968-16-5234-7

Impreso en México

Indice

DEDICATORIA

A Pico

PREFACIO

En la historia reciente de la física, y con toda seguridad también en muchas otras ramas de la ciencia, hallamos ejemplos de objetos elusivos, que no se dejan ver. Se tiene, por un lado, una teoría física bien establecida, como la mecánica cuántica, por ejemplo, que predice una serie de hechos que habrían de ser observables. Al descubrirlos experimentalmente, la teoría, ya comprobada en otras situaciones, recibiría una confirmación más y conquistaría una isla firme del conocimiento, plataforma segura para dar luego un paso más hacia adelante. Por el contrario, el no poder verificar esas predicciones podría dar al traste con el esquema teórico, o al menos retrasar su progreso.

Vienen a la mente tres revolucionarias predicciones, hechas en el primer tercio del siglo XX: las contenidas en las teorías de la relatividad de Einstein, las antipartículas de Dirac y el neutrino de Pauli. Las dos primeras recibieron pronta comprobación: entre 1916, cuando Einstein predijo que la luz debería desviarse al pasar cerca de un objeto muy masivo, y 1919, cuando Eddington observó tal desviación durante un eclipse de Sol, mediaron tan sólo tres años; y el positrón, antipartícula del electrón, cuya posibilidad había sido predicha por Dirac en 1930, fue descubierto por Anderson en 1932, dos años después. Sin embargo el neutrino, casi sin masa, que según Pauli debería acompañar a la desintegración beta para salvar así algo tan fundamental como el postulado de que la energía se conserva, resultó más elusivo; entre 1931, cuando Pauli lo propuso, y su descubrimiento por Reines, hubieron de pasar cerca de 25 años. No obstante, la gran ilusión se convirtió en realidad en estas tres historias.

Esa gran ilusión no se ha tornado en realidad en otros casos de predicciones también bien arraigadas en sus respectivas teorías físicas. Así, las ondas gravitacionales predichas por Einstein no han sido encontradas; los cuarks, que Gell-Mann imaginó en 1963 como los constituyentes del protón, han también rehuido a sus descubridores; los núcleos superpesados, mucho más que el uranio, tampoco se han dejado ver, y el monopolo magnético, imaginado por primera vez en 1932 por Dirac, se nos ha escondido. Empero, en ciertos momentos del desarrollo histórico de las teorías físicas de este siglo, se creyó (o aún se cree) firmemente en la existencia de estos objetos elusivos. Descubrirlos, por tanto, sería un gran honor para el experimentador que lo lograra.

No ha de extrañarnos, pues, que en diversas ocasiones grupos experimentales muy serios y en general de buena reputación, hayan echado las campanas al vuelo al anunciar que, por fin, la gran ilusión se confirmaba. Se han "descubierto" las ondas gravitacionales, el cuark, los núcleos superpesados y, al menos dos veces, el monopolo magnético. En todas las situaciones ocurrió lo mismo: un gran revuelo inicial al darse a conocer el descubrimiento sensacional; una rápida respuesta por parte de otros grupos experimentales, colegas y antagonistas del supuesto descubridor, que como jaurías se han lanzado a demostrar que el hallazgo había sido en falso; y el epílogo: que todo se debía a una falla experimental, a una mala calibración del aparato, a una confusión en los materiales observados, a un aparato poco sensible...

En la presente obra relataremos la historia, plena de ideas brillantes y experimentos precisos, del monopolo magnético, una de las grandes ilusiones de la física.

NOTA INTRODUCTORIA

La curiosidad de un físico supera a la de un niño. Al jugar con unos de esos perritos cuya base está imantada, el niño se da cuenta de que los juguetes se atraen o se repelen, según se les coloque. El imán tiene dos polos, uno de los cuales llamaremos positivo y el otro negativo. Los polos iguales se repelen y uno positivo atrae a otro que sea negativo. Un día, el niño travieso rompe la base de uno de sus perritos. Para su sorpresa, todo ocurre igual que cuando el imán estaba intacto. Al partir un imán en dos, se obtienen ¡dos imanes! A pesar de que lo hayamos roto, cada pedazo tendrá siempre un polo negativo y otro positivo. Por más que lo parta en mil pedazos, el niño en su travesura nunca logrará separar los dos polos, jamás producirá un imán de un solo polo, no obtendrá un monopolo magnético. Hasta ahora, igual que los niños traviesos que rompen imanes, los físicos no han sido capaces de producir un imán de un solo polo. Sin embargo, el monopolo magnético podría existir e incita, desde hace décadas, la curiosidad de los científicos. No ha de extrañarnos, pues, que muchos investigadores busquen de manera continua al monopolo, y que algunos hayan echado las campanas a vuelo al anunciar, por fin, que el monopolo magnético existe.

En la historia que vamos a relatar se cuenta la búsqueda —hasta ahora infructuosa— del monopolo magnético. Es una historia plena de ideas brillantes, de lucubraciones audaces y de experimentos muy precisos. Para entenderla, habremos de adentrarnos en el mundo misterioso de los fenómenos eléctricos y magnéticos, así como en el asombroso escenario donde actúan las partículas microscópicas que forman la materia.

I. UNA FAMILIA DE FÍSICOS

EN 1938 se funda el Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México. Ocupa una pequeña sede en un rincón del Palacio de Minería, situado en la calle de Tacuba número 5, no muy lejos del Templo Mayor de los aztecas y de la Catedral Metropolitana, en el centro histórico de la ciudad de México. En ese hermoso edificio, construido a finales del siglo XVIII por el arquitecto valenciano Manuel Tolsá, fueron profesores distinguidos dos grandes científicos que realizaron descubrimientos importantes: Andrés María del Río encontró allí uno de los elementos químicos: el vanadio; Fausto de Elhuyar descubrió el tungsteno. Don Fausto y su hermano mayor, naturales de Logroño, España, estudiaron mineralogía en Alemania, bajo la dirección de Werner, el geólogo que clasificó los minerales como antes había hecho Linneo con los seres vivientes. Los hermanos De Elhuyar visitaron luego Suecia, donde analizaron un mineral, la wolframita, que se halla en las minas de estaño. Ahí encontraron un nuevo metal, que hoy recibe el nombre de tungsteno —del sueco, piedra dura—. Don Fausto viajó después a México, para trabajar en el Palacio de Minería; cuando México ganó su independencia, regresó a su patria.

Más interesante aún resulta el descubrimiento del vanadio, o eritronio, como debería haberse llamado el nuevo elemento descubierto en el Palacio de Minería por Andrés María del Río. Don Andrés estudió también en Alemania, donde se hizo amigo del joven Humboldt. Por su cercanía con Lavoisier, a punto estuvo de ser guillotinado durante su estancia en París. Llega por fin a México y trabaja en la Escuela de Minas fundada poco tiempo antes por De Elhuyar. Allí, en 1801, descubre un nuevo metal dentro de un mineral de plomo y, por su color rojizo, le llama eritronio. Cuando Alejandro Humboldt visita México, le da las muestras para que sean analizadas en Alemania. Los químicos germanos se confunden y dictaminan que el eritronio es en realidad cromo, metal descubierto apenas tres años antes. Del Río, que trabajaba en un país carente entonces como hoy de tradición científica y de amor a la investigación, cede tristemente ante los embates de investigadores que él consideraba más avanzados. Treinta años después, el químico sueco Sefström vuelve a encontrar el eritronio, que hoy lleva el nombre de vanadio, en honor a una diosa de la mitología escandinava.

Como Del Río y Elhuyar, llega a México otro científico español, Blas Cabrera, miembro distinguido de un numeroso grupo de intelectuales republicanos que abandona su tierra luego del triunfo de Francisco Franco. Y como aquéllos, Cabrera trabaja en el Palacio de Minería, donde consigue instalar en el Instituto de Física un laboratorio de medidas eléctricas de precisión. Don Blas había sido director del instituto de Física y Química de la Universidad de Madrid y montó ese laboratorio para investigar el magnetismo de los cuerpos paramagnéticos, y por aquel entonces se le consideraba un físico notable, organizador, junto con Niels Bohr, Marie Curie y Albert Einstein del Congreso Solvay de 1930. Se le acredita también haber fundado la física experimental moderna en España.

Figura 1. Don Blas Cabrera asistió a la fundación de la sociedad Matemática Mexicana. El acto tuvo

lugar en el Palacio de Minería en 1942.

Uno de los hijos del doctor Cabrera, Nicolás, llegó a ser un científico notable. Su campo de estudio es el de los sólidos, en concreto el de las superficies; durante veintitrés años trabajó en la Universidad de Virginia, Estados Unidos, donde dirigió el Departamento de Física. Hace alrededor de quince años, Nicolás Cabrera regresó a España, para trabajar en la recién fundada Universidad Autónoma de Madrid, donde aún continúa estudiando la teoría de las superficies sólidas. Su influencia en el desarrollo de la física mexicana fue importante, pues durante su estancia en Virginia visitaba con frecuencia tanto la Universidad Nacional como el Instituto Politécnico, donde contribuyó a formar a jóvenes investigadores, muchos de los cuales son hoy puntales de la física en México.

Nicolás tuvo un hijo también imbuido por la curiosidad científica. El joven Blas Cabrera —nieto del físico español que se refugió en el Palacio de Minería hace ya medio siglo—, estudió la licenciatura en física en la Universidad de Virginia y luego hizo el doctorado bajo la dirección de William Fairbank, en Berkeley, Estados Unidos, donde obtuvo el grado en 1974. Al igual que su abuelo, primero, y su padre después, Blas Cabrera es hoy un físico reputado, que bien podría convertirse en un científico muy famoso, merecedor incluso de recibir el premio Nobel. En efecto, es posible que el 14 de febrero de 1982, día de la amistad, Blas Cabrera haya visto por primera vez un monopolo magnético.

II. EL EXPERIMENTO DE CABRERA

TÓMESE un anillo superconductor, colóquese en una región donde el campo magnético sea mucho muy débil y obsérvese la corriente eléctrica en el anillo, muy pacientemente, durante varios meses. Este fue el experimento que Blas Cabrera, quien trabaja en la Universidad de Stanford, realizó con todo acopio de paciencia durante más de doscientos días hasta que, por fin, encontró la huella de lo que podría ser el primer monopolo magnético observado por el hombre.

Como veremos, el experimento de Cabrera puede detectar una carga magnética en movimiento. Su detector es insensible a la velocidad del monopolo, a su masa y a su carga eléctrica, e incluso a su dipolo magnético. El paso de una carga magnética a través del anillo superconductor produciría un brinco en la corriente que circula por el anillo. Esto fue precisamente lo que Cabrera observó: un escalón en la gráfica de la Figura 2; esta gráfica bien podría hacerse famosa si el resultado de Cabrera se confirma.

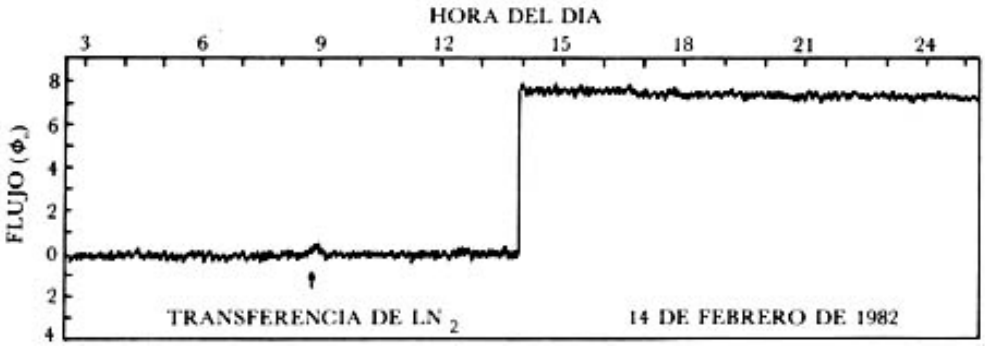

Figura 2. La gráfica muestra el cambio en el flujo magnético en el anillo superconductor. Éste es el evento que podría señalar el descubrimiento del monopolo magnético.

Desde luego, un solo suceso o evento experimental no es suficiente y la respuesta del detector podría ser espuria. Por ello, el experimentador debe ser muy cuidadoso y analizar todas las fuentes de error que se le ocurran. El cambio en la corriente observado por Cabrera podría ser causado por fluctuaciones pequeñas en el voltaje de la línea; estas variaciones fueron causadas a propósito y no hubo disparo en el detector. La interferencia electromagnética, inducida por motores y otros aparatos, también fue desechada, pues a propósito se hizo operar a varios cerca del detector y no hubo respuesta alguna. Un rayo cósmico habría podido golpear al anillo superconductor, elevar su temperatura y anular las propiedades superconductoras, pero Blas Cabrera también desecha esta fuente de error, porque el cambio en la temperatura no es suficiente. Podría también haber causas mecánicas, como las producidas por un temblor o por un golpe al aparato. No se registró ningún disturbio sísmico el 14 de febrero de 1982 y, por otro lado, el investigador intentó producir una respuesta de su aparato golpeando el detector con el mango de un desarmador, por ejemplo. En fin, parecería ser que ese único evento, registrado el día de San Valentín, sólo pudo ser causado por el paso del elusivo monopolo magnético.

III. LA BÚSQUEDA ANTERIOR

EL MONOPOLO magnético fue primero buscado en los rayos cósmicos de muy alta energía. Puesto que la traza de un monopolo quedaría impresa en materiales muy viejos, no conductores, se buscó su huella en muestras de obsidiana muy antiguas, cuya edad supera los 200 millones de años. Los investigadores Fleisher, Price y Woods de la Universidad de Berkeley no fueron capaces de encontrar una sola carga magnética. También llegaron los físicos al fondo del océano, buscando un monopolo en el pavimento de ferromanganeso que cubre la base del Atlántico del Norte. Este material magnético podría haber atrapado a los monopolos presentes en la radiación cósmica, después de que hubieran sido frenados al atravesar el mar. Si a las muestras de ferromanganeso se les aplicara un campo magnético muy intenso —pensaron los físicos— podrían arrancar al monopolo del sitio en que había estado quieto por varios millones de años. Este experimento realizado de nuevo por Fleisher y sus colaboradores tampoco arrojó resultados positivos. Los investigadores buscaron entonces en la Luna, y analizaron las muestras lunares que el Apolo 11 trajo a la Tierra. Si estas muestras tuvieran monopolos magnéticos podrían inducir una corriente en una bobina, al moverse cerca de ella. Una vez más la carga magnética no hizo acto de presencia y la búsqueda del monopolo en la Luna, realizada por Luis Álvarez, premio Nobel de Física e investigador de la Universidad de Berkeley, resultó también infructuosa.

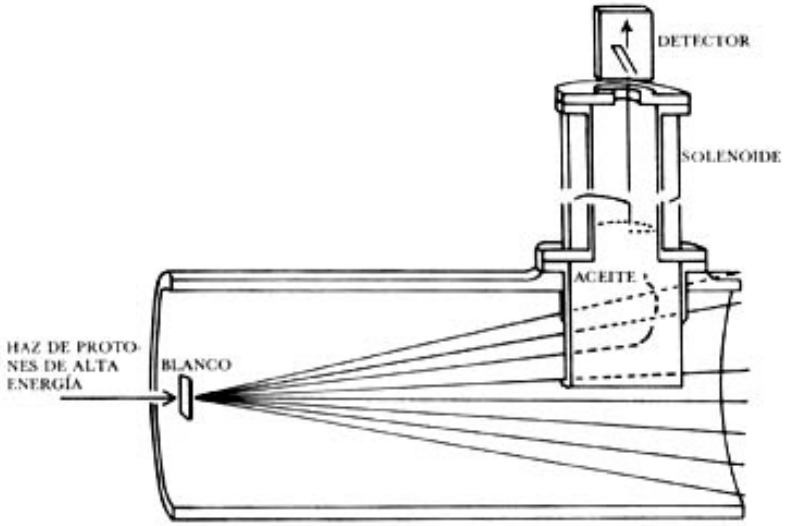

Figura 3. El experimento realizado en Brookhaven en 1962 intentaba crear monopolos por el choque de protones muy energéticos contra hojas muy delgadas de aluminio. El monopolo se detendría en el aceite y luego sería acelerado por un campo magnético hacial el detector. No se detectó ningún monopolo en este experimento.

Todos estos experimentos dependen de rayos cósmicos de muy alta energía y, por tanto, se realizan sin mucho control. La búsqueda sería más simple si se emplean los haces de partículas —cuya energía está a nuestro arbitrio— provenientes de los grandes aceleradores, como los que están hoy disponibles en enormes laboratorios como el Fermilab o el Consejo Europeo de Investigaciones Nucleares (CERN) en Ginebra. Al incidir protones y electrones de muy alta energía sobre la materia, se podrían producir cargas magnéticas. Otra vez se movieron las muestras bombardeadas en la vecindad de una bobina, buscando la corriente inducida por el monopolo. Como en los experimentos anteriores, la elusiva unidad de carga magnética no se dejó ver y el grupo de Álvarez, una vez más, no tuvo éxito.

La primera evidencia positiva de la presencia del monopolo magnético la obtuvo otro grupo de Berkeley en 1975. En una pila de detectores que colocaron en un globo durante dos días, hallaron una sola traza marcada por rayos cósmicos ultrapesados que, según Price y sus colegas, se debía a una partícula que se movía a la mitad de la velocidad de la luz y que ionizaba fuertemente y de manera constante a la materia.

Para que esta ionización pudiera ser causada por una carga eléctrica, esta partícula debería tener una masa enorme, mayor que la de diez mil protones juntos. Es más razonable, pues, suponer que este evento fuera causado por un monopolo magnético.

La reacción que manifestaron los científicos ante esta "comprobación" experimental de la existencia de la carga magnética nos la relata el gran físico teórico inglés Paul Adrien Maurice Dirac. Cuenta que se encontraba discutiendo acerca de monopolos en Sidney, buscando posibles explicaciones a la traza hallada por Price. Llamaron por teléfono a Luis Álvarez —jefe de Price y autor de varios de los trabajos con resultados negativos— y éste se mostró muy hostil a la interpretación de Price y ofreció otra explicación. Aunque esta nueva idea de Álvarez fue desechada un año después, Dirac mismo no da gran peso a la evidencia de Price, pues los monopolos, en caso de existir, serían estables y deberían encontrarse en la atmósfera, en la corteza terrestre o en el mar.

Indice

VI. UN PUNTO DE VISTA SOBRE LA FÍSICA TEÓRICA

NUESTRO relato ha estado lleno de conceptos e ideas aparentemente extrañas. Para entender lo que propuso Dirac, necesitamos antes saber qué son los campos eléctricos y magnéticos y comprender las ideas básicas de la mecánica cuántica. Los desarrollos recientes de las teorías sobre el monopolo magnético nos llevarán también de la mano a asomarnos al mundo de las partículas elementales, aquellas que supuestamente son los constituyentes últimos de la materia. Por otro lado, no podremos apreciar los esfuerzos de Cabrera, de Álvarez y de tantos otros, si no sabemos qué es la ionización, la superconductividad y otros fenómenos que ocurren en la materia. Para gozar de todo lo que implica la búsqueda del monopolo, tendremos, pues, que explicar esos conceptos y fenómenos. Pero antes de proceder en esta dirección, comenzando por la teoría electromagnética, es conveniente reproducir aquí el prólogo al tantas veces mencionado artículo de Dirac. En él se expone claramente el punto de vista que sobre la física teórica tiene uno de los mayores científicos del siglo. Siempre fiel a su principio: "Es más importante que las ecuaciones de una teoría sean bellas, que ajustar los datos experimentales", Dirac escribió en 1931:

El progreso continuado de la física requiere para su formulación teórica de una matemática que se torna siempre más compleja. Esto es natural y era de esperarse. Lo que, sin embargo, no esperaban los científicos del siglo pasado era la manera peculiar en que las matemáticas avanzarían. Se esperaba que las matemáticas serían más y más complejas, pero que siempre descansarían sobre una base permanente de axiomas y definiciones. Por el contrario, los desarrollos físicos modernos han requerido una matemática que continuamente cambia sus fundamentos y se hace más abstracta. La geometría no euclidiana y el álgebra no conmutativa, que en un tiempo fueron consideradas ficciones puras de la mente y pasatiempos de pensadores lógicos, hoy son necesarias para la descripción de muchos hechos que ocurren en el mundo físico. Parece factible que este proceso, en que la abstracción aumenta, continuará en el futuro y que el avance de la física estará asociado a una modificación continua y a la generalización de los axiomas que se hallan en la base misma de la matemática, y no a un desarrollo lógico de un esquema matemático dado que descanse sobre fundamentos ya establecidos.

En el presente, varios problemas fundamentales de la física teórica aguardan solución: se tiene, por ejemplo, que lograr la formulación relativista de la mecánica cuántica y entender la naturaleza de los núcleos atómicos (para luego intentar resolver problemas mucho más difíciles, como el de la vida). Estas soluciones requerirán, muy probablemente, de una revisión drástica de nuestros conceptos fundamentales, más profunda tal vez que ninguna hecha hasta ahora. Posiblemente, tales cambios serán tan grandes, que el concebir las nuevas ideas necesarias para formular los datos experimentales en términos matemáticos excederá el poder de la inteligencia humana. El científico teórico habrá de proceder en el futuro de una manera indirecta. El método de avance más poderoso que puede sugerirse en el presente consiste en emplear todos los recursos de las matemáticas puras para perfeccionar y generalizar el formalismo matemático que se halla en la base de la física teórica, y después de haber alcanzado éxito en esta dirección, tratar de dar una interpretación de la nueva matemática en términos de entidades físicas.

Dirac prosigue así en su introducción al artículo en que sugiere que el monopolo magnético existe:

Un articulo reciente[1] del autor podría tal vez considerarse como un pequeño paso que sigue este esquema general. El formalismo matemático válido hasta entonces sufría de serias dificultades, pues predecía valores negativos para la energía cinética de un electrón. Se propuso vencer esta dificultad al usar el principio de exclusión de Pauli, que no permite a más de un electrón ocupar cada estado, postulando que en el mundo físico casi todos los estados de energía negativa están ya ocupados, de tal forma que los electrones ordinarios no pueden caer a esos estados. La cuestión que entonces queda abierta se refiere a la interpretación de esos estados de energía negativa, los cuales, desde este punto vista, existen realmente. Esperaríamos que esa distribución de estados de energía negativa nos fuera totalmente inobservable, pero que si uno de esos estados no estuviera ocupado, al ser algo excepcional, se haría sentir como algún tipo de agujero. Se demostró que estos agujeros aparentarían ser una partícula con energía y carga positivas, y se sugirió que tal partícula debería ser identificada con un protón. Investigaciones subsecuentes, sin embargo, mostraron que esta partícula debe tener, por necesidad, la misma masa del electrón y que, si chocara con un electrón, ambas se aniquilarían con una probabilidad tal que fuera consistente con la estabilidad de la materia.

Todo parece indicar que deberíamos abandonar la identificación de agujeros con protones y que habría que buscar alguna otra interpretación para ellos. Siguiendo a Oppenheimer, podemos suponer que en el mundo como lo conocemos, *todos,* y no solamente casi todos, los estados de energía negativa para los electrones están ocupados. Un hoyo, si hubiera alguno, sería una nueva clase de partícula, desconocida para la física experimental, con igual masa y carga opuesta a la del electrón. Podemos llamar a tal partícula un antielectrón. No esperaríamos hallarlas en la naturaleza, debido a la rapidez con que se combinan con los electrones, pero si acaso pudiéramos producirlas experimentalmente en el alto vacío serían bastante estables e incluso observables. Cuando chocan dos rayos gamma duros (cuya energía fuera al menos medio millón de electrón-voltios) podrían crearse simultáneamente un electrón y un antielectrón, con una probabilidad del mismo orden de magnitud que la colisión entre dos rayos γ, bajo la suposición de que éstos fueran esferas del mismo tamaño que un electrón clásico. Tal probabilidad es despreciable, sin embargo, de acuerdo con las intensidades de rayos gamma hoy disponibles.

Los protones, desde la perspectiva anterior, están pues desconectados de los electrones. Quizá los protones tengan sus propios estados con energía negativa, todos ellos normalmente ocupados, aunque un estado tal que estuviera desocupado aparecería como un antiprotón.[2] En este momento, la teoría es incapaz de dar razón alguna por la que electrones y protones debieran ser diferentes.

Llegado a este punto, Dirac aclara lo que intenta en su trabajo: ni más ni menos que proponer el monopolo magnético, contribuyendo así una vez más a la revolución cuántica. Nos dice:

El objetivo de este artículo es presentar una nueva idea, comparable en muchos aspectos a aquélla sobre las energías negativas. No tratará, en su esencia, sobre electrones y protones, sino con la razón de existir de la carga eléctrica más pequeña. Se sabe que esta carga existe experimentalmente y que tiene un valor *e*, dado en forma aproximada por[3]

$$\hbar c / e^2 = 137$$

La teoría de este trabajo —aunque a primera vista parecería dar un valor para *e*—, proporciona tan sólo una conexión entre la carga eléctrica más pequeña y el menor polo magnético. Muestra, de hecho, una simetría entre electricidad y magnetismo ajena a las opiniones en boga. No fuerza, sin embargo, una completa simetría, como no se impone la simetría entre electrones y protones al adoptar la interpretación de Oppenheimer. Sin esa simetría, la razón $e^2/\hbar c$ permanece indeterminada desde el punto de vista teórico y, si introducimos el valor 1/137 en la teoría, se generan diferencias cuantitativas tan grandes entre magnetismo y electricidad, que se torna comprensible porque sus semejanzas cualitativas no han sido descubiertas experimentalmente hasta el presente.

NOTAS

1 Se refiere al que publicó en 1950 en los mismos *Proceedings of the Royal Society*, donde nace la idea de antipartícula y por el cual habría de recibir el premio Nobel un par de años después.

2 Un cuarto de siglo después de que Dirac escribió este párrafo, el físico italiano Emilio Segré descubrió el antiprotón y por ello recibió el premio Nobel de Física en 1959.

3 En esta relación maravillosa, que luego apreciaremos en su prístina belleza, sólo tienen lugar constantes fundamentales: $\hbar$ **= *h/2p* =1.05443 x 10-27 ergs**, la llamada constante de Planck; **c = 2.997930 x 10^{10}cm/s**, la velocidad de la luz, y **e= 4.80286 x 10^{10} statc**, la carga eléctrica del electrón. La presencia de h resalta la naturaleza cuántica de la relación, **c** se refiere a su carácter relativista, y e nos recuerda que algo de las propiedades eléctricas de la materia entra en juego. Nos referimos, pues, a la teoría cuantico-relativista del electromagnetismo, a la así llamada electrodinámica cuántica. Mucho nos dice el valor de ese número sin dimensiones $e^2/\hbar c = 1/137$ sobre esta ambiciosa teoría.

VII. LA BALANZA DE TORSIÓN

EMPECEMOS nuestro viaje por la física que precedió a Dirac, hasta llegar a la época de la Gran Depresión, cuando este gran teórico propuso el monopolo magnético. Veamos primero lo concerniente a cargas y corrientes eléctricas.

La balanza de torsión es un aparatito muy simple. Consiste de una barra que cuelga de un hilo que puede torcerse. Si la barra gira, el hilo tiende a regresarla a su posición original. Cuando llegamos a conocer la fuerza de torsión que el alambre ejerce sobre la barra, tenemos un mecanismo muy sensible para medir fuerzas. Podemos, por ejemplo, colocar una partícula cargada en uno de los extremos de la barra y acercarle un imán u otra carga. Con este dispositivo tan sencillo se han hecho tres experimentos de gran importancia en la historia de la física.[1] Charles Coulomb, ingeniero militar francés, inventó la balanza de torsión en 1777, y puso este delicado instrumento al servicio de la electricidad. Coulomb buscaba mejorar la brújula de los marinos y para ello experimentaba con cargas eléctricas. Colocó una pequeña esfera cargada en la barra de la balanza y luego, a diferentes distancias, otra esferita igualmente cargada. Entonces midió la fuerza entre ellas, fijándose en el ángulo en que la barra giraba. Así encontró en 1785 la ley que rige la fuerza entre dos cargas eléctricas, ley que llamamos de Coulomb en su honor, y que afirma que la fuerza es proporcional al producto de las cargas y disminuye con el cuadrado de la distancia entre ellas. Como en la naturaleza existen dos tipos de cargas, que por convención llamamos positivas y negativas, la ley de Coulomb nos dice también que cargas iguales se repelen y las de signo contrario se atraen. Además, la fuerza eléctrica es, como toda fuerza, un vector que tiene dirección; ésta apunta a lo largo de la línea que une las dos cargas.

La ley que Coulomb, al igual que la de la gravitación universal descubierta por Newton (antecesor de Dirac en la Cátedra Lucasiana de Matemáticas en Cambridge) a principios del siglo XVII, ocupa un lugar de privilegio en la ciencia. Es simple y bella, y es de aplicación muy general. Ha resistido hasta el presente los embates de miles de físicos en todo tipo de circunstancias y experimentos. Por ello es una de las leyes fundamentales de la física.

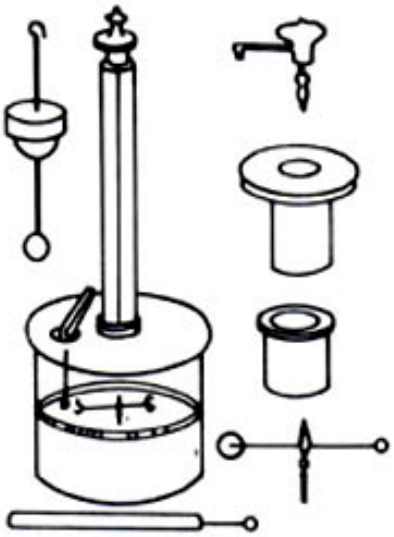

Figura 6. La balanza de torsión que usó Coulomb.

Si colocamos una esfera cargada muy pequeñita, casi puntual, en un sitio fijo del espacio y luego le acercamos alguna otra carga conocida para atestiguar la fuerza que esta última siente, podemos hacer un mapa con las mediciones resultantes. El mapa debería ser en tres dimensiones y en él asociaríamos a cada punto del espacio un vector, que podemos representar por una flecha. La dirección de esta flecha es la de la fuerza, y su largo daría una indicación de la magnitud de la atracción entre la esfera cargada y la carga que usamos como testigo. Como lo que deseamos caracterizar es a la esfera, se tiene que eliminar la carga

del testigo. Por ello es mejor pintar la fuerza por unidad de carga de la partícula testigo, la cual por convención se considera siempre una carga positiva. Con ello, el mapa queda bien establecido y nos da una idea de la fuerza eléctrica que, alrededor de una partícula cargada, sentiría por cada unidad de carga positiva un testigo. En la Figura 7, a y b, pueden observarse ejemplos de mapas empleados para una carga y para una superposición de dos cargas. A este nuevo vector, fuerza por unidad de carga, que ya no depende del testigo que empleemos, se le llama la intensidad del campo eléctrico producido por una distribución dada de partículas cargadas. A mapas como el de la figura le llamamos un campo de vectores. Diremos, pues, que las cargas generan un campo eléctrico, es decir, que son la fuente de este campo.

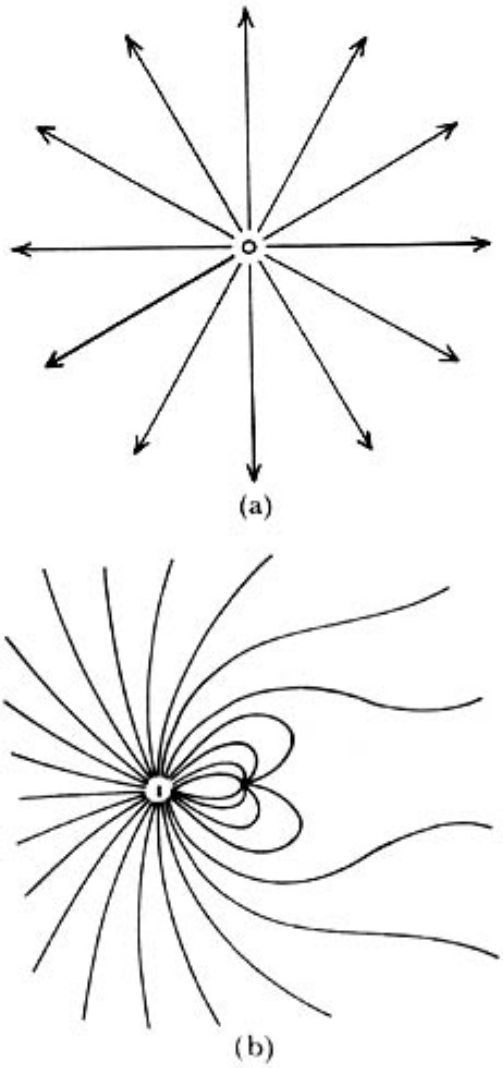

Figura 7. Líneas de campo eléctrico para *(a)* una carga positiva y *(b)* dos cargas, una de ellas igual a +1 y la otra igual a -2.

NOTAS

1 Además de la ley de Coulomb, con la balanza de torsión. Cavendish demostró por primera vez la ley de la gravitación universal en un laboratorio terrestre y, en el siglo XIX, el barón de Eötvös la usó para mostrar el principio de equivalencia: la masa inercial es igual a la masa gravitacional. Este último principio es la base de la teoría general de la relatividad, propuesta por Einstein en 1916.

V. DIRAC Y EL MONOPOLO MAGNÉTICO

NO HA de extrañarnos, pues, que una sugerencia teórica del famoso y distraído[1] Dirac fuera atendida con cuidado por sus colegas experimentales, sobre todo porque es una idea que rescata en parte la simetría del electromagnetismo. En efecto, uno de los avances científicos más notables del siglo pasado fue, sin duda, el establecimiento de la teoría electromagnética, que liga los fenómenos eléctricos con los magnéticos. En esta teoría, que nos ha permitido entender en buena medida el comportamiento de la luz y que ha hecho posible las comunicaciones modernas, se supone la existencia de la carga eléctrica y la falta de su análogo magnético, el monopolo. En el electromagnetismo clásico el monopolo magnético no existe. En consecuencia, las ecuaciones básicas de la teoría electromagnética —las famosas ecuaciones de Maxwell— no tratan por igual a las cantidades eléctricas y a las magnéticas. Esta falta de simetría, que se remediaría de existir el monopolo magnético, le resta a las hermosas ecuaciones de Maxwell un poco de belleza.

El monopolo magnético introduciría en la electricidad y el magnetismo una simetría de la cual carecen en nuestra visión actual. Como veremos, la teoría hoy en boga considera al magnetismo como un subproducto —casi accidental— de la electricidad. El magnetismo existe sólo como resultado de que las cargas eléctricas se muevan. Una partícula cargada origina un campo eléctrico a su alrededor, y cuando esa carga se mueve produce un campo magnético, como un efecto secundario. En aras de la simetría, debería haber también cargas magnéticas que originaran campos magnéticos y que, al moverse, crearan en su entorno campos eléctricos exactamente en la misma forma que las partículas elementales de electricidad producen un campo magnético. Las partículas magnéticas podrían emitir y absorber luz (igual que lo hace un electrón) y, viceversa, en la misma forma en que un fotón energético puede engendrar un electrón y un positrón, también podrían crearse un par de monopolos al desaparecer la luz.

Figura 5. P. A. M. Dirac (1902-1984).

La idea que Dirac tuvo al proponer el monopolo, propuesta que como ya dijimos hizo tan sólo un año después de predecir la existencia del positrón, ha inspirado una larga serie de investigaciones, tanto teóricas como experimentales. Hasta ahora, la búsqueda del monopolo magnético ha sido frustrante. Salvo

dudosas excepciones, los experimentadores no han hallado signos del monopolo. Por su parte, los teóricos no han podido fincar una buena razón por la cual el monopolo no debiera existir. Por ello se le sigue buscando: en ausencia de una ley que prohiba la ocurrencia de un fenómeno, éste debe darse aunque sea con una bajísima probabilidad. Todo aquello que pueda ocurrir, ocurrirá. Por eso los físicos continúan empeñados en buscar el monopolo magnético, aun cuando haya transcurrido medio siglo desde el brillante trabajo de Dirac. Si bien la búsqueda de la carga magnética no está siempre en la frontera más activa de la ciencia, cuando la gran ilusión parece a punto de tornarse en realidad se convierte de nuevo en tema de conversación cotidiana entre los físicos. Descubrir el monopolo, o aun la ley que impida su existencia, conmovería la física hasta sus bases.

NOTAS

1 Desde 1952 Dirac fue nombrado a la Cátedra Lucasiana de Matemáticas en Cambridge, famosa por haber sido ocupada por Newton. Luego se casó con la hermana de otro físico connotado, Eugene Wigner, con la cual tuvo descendencia. Es conocida la historia que corre acerca del día en que nació su primogénito: cuando ya su esposa sentía los dolores del parto. Dirac salió corriendo por los pasillos del Instituto al mismo tiempo que gritaba: ¡La hermana de Wigner va a tener un hijo, auxilio, auxilio!

Indice

VIII. CARGAS EN MOVIMIENTO

COULOMB, y con él nosotros hasta aquí, hemos analizado cargas en reposo. ¿Qué sucede cuando una carga eléctrica se pone en movimiento? Este es un fenómeno muy común en nuestros días, pues lo que se produce es una corriente eléctrica. Una forma habitual de generarla es conectar un alambre conductor, de cobre, por ejemplo, entre los polos de una batería. Esto produce una fuerza eléctrica sobre las partículas que forman el alambre. Las partículas son de dos tipos: iones muy pesados que casi no se mueven y electrones mucho más ligeros que responden ágilmente al campo eléctrico que genera la batería. Como la materia es eléctricamente neutra y los electrones están cargados negativamente, los iones deben ser positivos. Se puede, por consiguiente, imaginar la corriente eléctrica en un alambre recto como se ve en la Figura 8.

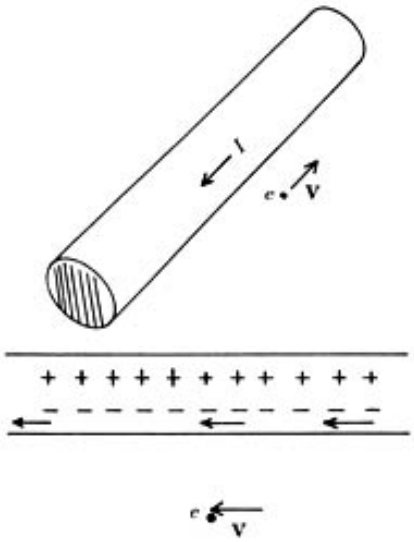

Figura 8. La corriente eléctrica se genera dentro de un alambre metálico porque los electrones, que tienen carga negativa, se mueven, los iones positivos, por su parte, permanecen casi quietos.

Podemos ahora jugar experimentalmente con corrientes eléctricas y plantearnos una multitud de cuestiones. Coloquemos dos alambres rectos, uno paralelo al otro, y circulemos una corriente en uno de ellos y en el otro no; vemos que casi no ocurre nada. Luego hagamos circular corriente por los dos alambres. Si hay corriente en el mismo sentido en ambos conductores, se observa entonces una fuerza atractiva entre los dos alambres. Por el contrario, si los electrones se mueven en sentido contrario en uno y otro conductor, los alambres se repelen. ¿Cómo podemos explicarnos esta nueva fuerza? En particular, ¿es este efecto experimental explicable mediante lo que ya sabemos sobre la fuerza de Coulomb, que actúa sobre cargas en reposo?

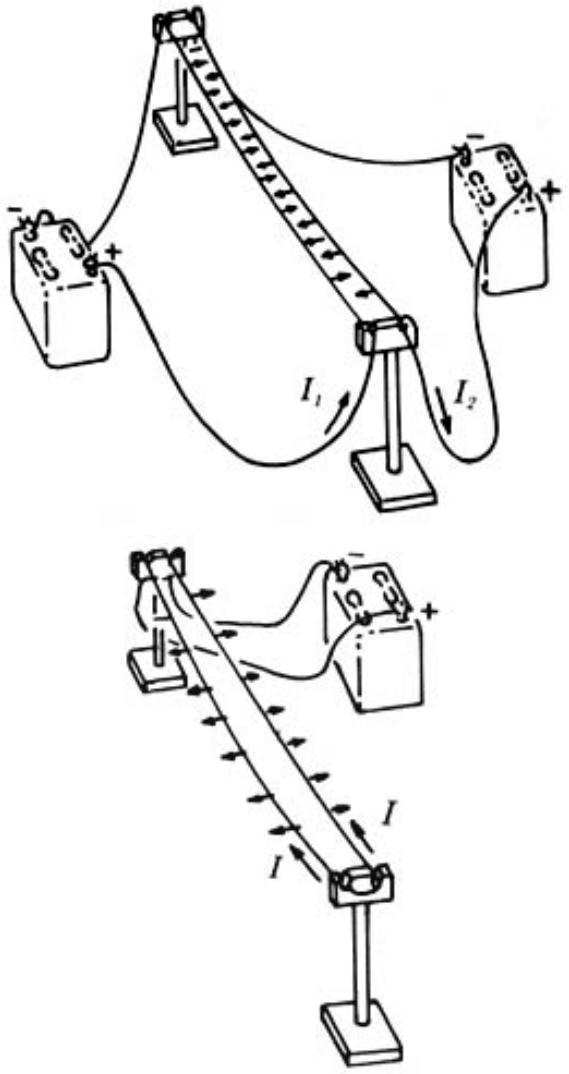

Figura 9. Cuando la corriente circula en el mismo sentido en los dos alambres, éstos se repelen; lo contrario ocurre al circular corrientes de sentidos opuestos.

Problemas como éste, que pertenecen a la electrodinámica de los cuerpos en movimiento, condujeron a Albert Einstein a una revisión profunda de los conceptos de espacio y tiempo, de lo que significa que un experimentador observe un fenómeno; en fin, a un cuestionamiento muy profundo de lo que es la física. Veamos algunos de los razonamientos que condujeron a la teoría de la relatividad, propuesta por Einstein en 1905, cuando trabajaba en la oficina de patentes en Berna.

Empecemos por disectar el experimento de los dos alambres, reduciendo uno de ellos a una sola carga en movimiento, como se ve en la Figura 8. En tal caso, el experimento nos dice que cuando hay corriente en el alambre y la velocidad de la carga es diferente de cero, sobre la partícula cargada actúa una fuerza; si, por otro lado, la partícula se halla quieta respecto al alambre, la fuerza es nula.

Hagamos un modelo físico para entender el experimento. Con objeto de que el alambre no tenga una carga neta, como no la tiene la materia en bulto, imaginemos que el número de iones positivos (y quietos) por unidad de longitud es igual al número de electrones, también por unidad de longitud, que se mueven dentro del alambre. Como el efecto de cada carga negativa se anula con el de las cargas positivas, la fuerza neta de Coulomb sobre una carga testigo en reposo es nula. No hay fuerza sobre ella. Si el observador ve que la carga testigo no se mueve en un instante dado, la verá siempre quieta. Es como si el campo total de fuerzas sobre la carga testigo se anulara.

Empero, el observador es ajeno por completo al sistema. ¿Qué pasaría si, al mirar detenidamente a la

partícula testigo y ver que nada ocurre, se aburriera y empezara a caminar? O mejor aún, ¿qué diría otro observador que en el momento en que su amigo el físico realizaba el experimento anterior pasaba por ahí en su automóvil? Imaginar estos experimentos, que con justicia se llaman experimentos pensados, fue para Einstein un pasatiempo favorito. En este sentido, Albert Einstein no sólo fue un gran teórico sino también un gran experimentador, que realizaba con maestría sin igual maravillosos experimentos... pensados.

El observador en movimiento vería no sólo que por el alambre circula una corriente sino también que la carga se mueve. Ya que él también es físico, y su amigo, el experimentador quieto, le había platicado, cuando se reunían para hablar de física en el café todos los días a las once, que la carga en movimiento y en presencia de un alambre con corriente sentía una fuerza, ambos amigos parecen contradecirse. Uno de ellos, el que se halla en el laboratorio y está siempre en reposo, concluye que no hay fuerza. El otro, que nada tiene que ver con el experimento y se encuentra en movimiento uniforme, moviéndose con velocidad constante respecto a la carga testigo, concluye que sí hay fuerza pues la carga se mueve también respecto a él: la partícula para él debería acelerarse. Pero el segundo físico bien sabe que él nada tiene que ver con el experimento y, por tanto, corre a plantear la paradoja a su amigo.

Ambos están de acuerdo en que dos observadores que se mueven con velocidad constante uno respecto al otro deben manejar las mismas leyes de la física. Éstas no pueden variar con el estado de movimiento del observador. Este principio, que llamaremos de relatividad, se los enseñó el gran Galileo al iniciar lo que hoy es la mecánica clásica en la época del Renacimiento.

Deciden pues razonar juntos, para buscar una salida a la paradoja que se les plantea. Lo primero que les pasa por la mente es suponer que algo ocurre con la carga eléctrica cuando su portador se mueve, como ocurre con los electrones en el alambre. Para poner a prueba su hipótesis de que la carga cambia al entrar en movimiento, decidieron hacer un experimento. Tomaron el átomo más sencillo, el de hidrógeno, que consta de un protón cargado positivamente y de un electrón que tiene carga negativa, e igual en magnitud a la del protón. Por ello, el átomo es eléctricamente neutro. Sin embargo, el electrón es muy ligero y se mueve alrededor del protón con una velocidad grandísima, del orden de un centésimo de la velocidad de la luz. Si el átomo de hidrógeno continuara siendo neutro, sin importar su estado de movimiento, la hipótesis sería falsa. Esto fue lo que observaron, por lo que lógicamente concluyeron que la carga eléctrica no cambia con el estado de movimiento de las partículas. Dos observadores en movimiento uniforme relativo observan siempre la misma carga. Pueden decir, como hoy se acostumbra, que la carga es un invariante relativista.

Si las cargas no cambian, pensaron nuestros dos físicos de la historia (o del experimento pensado) que estamos relatando, la única otra forma de destruir la paradoja es pensar que la densidad de carga —que es igual a la carga por unidad de longitud— sí cambie cuando la midan distintos observadores en movimiento relativo. Esto produciría un amontamiento de cargas negativas distinto al de las positivas y podría haber un efecto neto sobre la carga testigo, producido por la fuerza eléctrica de Coulomb. De paso, pensaron, explicaríamos la atracción o repulsión entre los alambres conductores con corriente, que es el experimento que originalmente querían entender.

La cuestión es, pues, si la distancia entre dos puntos es un invariante relativista o no. Es decir, necesitamos saber si al medir desde un auto en movimiento una varilla que tiene 1 metro de longitud en el laboratorio, obtendríamos también el valor 1 metro como resultado. Aquí entra Einstein con su teoría de la relatividad a la mano.

IV. EL GRAN PAUL ADRIEN MAURICE DIRAC

¿POR QUÉ? Cabrera y otros muchos físicos antes que él han buscado afanosamente el monopolo magnético? La respuesta, en buena medida, se debe a la fama del gran físico inglés Paul Adrien Maurice Dirac, quien en 1931 sugirió que así como había partículas elementales de electricidad —el electrón, por ejemplo—, así debería haber partículas elementales de magnetismo. En igual forma que el electrón acarrea una unidad de carga eléctrica, debiera existir una carga magnética. Y, a semejanza de la carga eléctrica, que puede ser positiva o negativa, la magnética puede darse como "polo norte" o "polo sur". Por ello, la supuesta carga magnética sería el monopolo magnético.[1]

Cuando Dirac publicó en los *Proceedings of the Royal Society* su articulo titulado "Singularidades cuánticas en el campo electromagnético", en el que sugiere que el monopolo magnético existe, ya era un físico famoso, sin duda uno de los grandes teóricos del siglo XX. Se graduó primero de ingeniero electricista en la Universidad de Bristol; en 1921, al no hallar un empleo apropiado, continuó estudiando, aunque ahora matemáticas y en Cambridge, donde obtuvo su doctorado en 1926. Al final de sus estudios, Dirac estaba convertido en un físico-matemático de primera línea, listo para cristalizar una de sus más firmes creencias: "Es más importante que las ecuaciones de una teoría sean bellas, que ajustar los datos experimentales."

Hacia fines de los alegres veintes, la mecánica cuántica estaba firmemente establecida. Gracias a los esfuerzos de Werner Heisenberg y Erwin Schrödinger, principalmente, la física toda había sufrido un enorme cataclismo, la revolución cuántica ocurrida alrededor de 1924. Culmina así una larga secuencia de brillantes ideas: Max Planck inventa el cuanto o paquete de energía en 1900; Einstein explica el efecto fotoeléctrico —y con ello inventa el fotón, el cuanto electromagnético— en 1905; Bohr introduce sus postulados en 1911 y De Broglie asocia en 1923 propiedades ondulatorias a partículas microscópicas como el electrón. Todo ello se resume en la teoría cuántica, conjunto de leyes que rigen la vida y la acción de las partículas muy pequeñas.

Cuando Dirac comenzó a trabajar, también se encontraba ya sobre bases firmes, plenamente comprobada y más allá de toda duda la teoría de la relatividad. Estas ideas relativistas, enunciadas primero por Einstein en 1905, constituyen un conjunto conceptual que describe la física de los sistemas muy veloces. Al igual que la mecánica cuántica, la física relativista constituyó una revolución en la ciencia, que hizo temblar en sus cimientos a la física construida por Galileo, Newton, Maxwell y tantos otros.

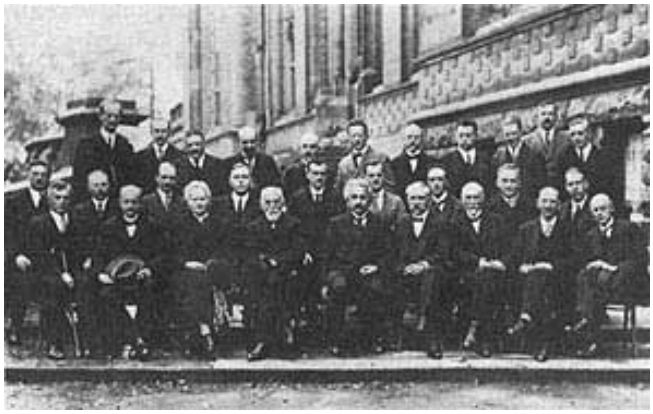

Figura 4. Los creadores de la nueva física reunidos en el congreso Solvay de 1924.

¿Qué sucede cuando se intenta describir un mundo habitado por partículas pequeñas y muy veloces, como bien puede ser un electrón? Esta fue la pregunta clave que se planteó Dirac, buscando una mecánica que fuera al mismo tiempo cuántica y relativista. Esta unión cuántico-relativista se enfrenta a multitud de problemas, que casi producen el divorcio entre las dos teorías. Sin embargo, Dirac no se arredró y, guiado por ese afán de buscar la simetría y la belleza en sus ecuaciones, postuló que el electrón tenía que obedecer

una ecuación relativista y cuántica, ecuación que hoy lleva su nombre. En 1930, Dirac encuentra que su ecuación predice junto al electrón otra partícula parecida a éste, pero con una carga positiva. Y no sólo eso, sino que estas partículas son como dos Caínes, hermanos que al encontrarse se aniquilan. Aunque primero se pensó que este antielectrón podría ser el protón, esta idea fue pronto desechada. No pasaron dos años, sin embargo, para que en 1932 se descubriera la antipartícula del electrón —el hoy llamado positrón—, y se comprobaran las ideas de Dirac, que al principio parecieron descabelladas. Por este trabajo, Paul Dirac recibió junto con Schrödinger el premio Nobel correspondiente al año de 1933.

NOTAS

1 Resulta interesante mencionar que el creador del electromagnetismo, James C. Maxwell, incluyó el monopolo magnético cuando presentó sus ecuaciones por primera vez, hacia mediados del siglo pasado. Sin embargo, en la segunda publicación donde aparecen sus famosas ecuaciones ya no figuran los monopolos magnéticos.

IX. UN ABSOLUTO POR OTRO

CUANDO Einstein terminó sus estudios en la Escuela Politécnica de Zurich, buscó empleo en el medio académico y, como tantos otros antes y después que él, no encontró uno que le fuera satisfactorio. Por ello ingresó a una oficina burocrática, donde analizaba patentes cuidando que los inventos no fueran fantasiosos y contradictorios a las leyes naturales. Allí meditaba sobre el tiempo absoluto de Newton, que fluye por igual para todos los observadores. Allí también pensaba en las mediciones sobre la velocidad de la luz, que aparentemente se movía igual sin importar desde qué sistema se le observe. ¿Qué pasaría, se dijo Einstein, si canjeáramos un absoluto por otro? Así, postulando que la velocidad de la luz es la misma para todos los observadores en movimiento uniforme relativo, entendemos experimentos como el que Michelson y Morley hicieron en 1887. Con ello abandonamos un absoluto —el tiempo newtoniano— y lo reemplazamos por otro —la velocidad de la luz—, pero ganamos mucho al mismo tiempo. Einstein postuló, pues, que existe una velocidad máxima con la cual se puede transmitir información. Ésta es una ley de la física. Entonces, de acuerdo al principio de relatividad, esta velocidad máxima debe ser igual para todos los observadores en movimiento relativo uniforme. Ya que la velocidad de la luz, que vale aproximadamente 300 000 km/seg, es la velocidad mayor medida hasta ahora por el hombre, es lógico suponer que aquella velocidad máxima sea la de la luz.

De acuerdo a lo anterior, podemos ya expresar en pocas palabras el nuevo principio de relatividad, ahora a la Einstein: las leyes de la física son las mismas cuando se observan desde laboratorios en movimiento relativo uniforme y en ellos la velocidad de la luz es la misma. Con este inocente canje de absolutos se engendró toda una revolución en la física, en la química y en la astronomía; además, la cosmología pasaría a convertirse en una verdadera ciencia.

No nos ocuparemos aquí en deducir los cambios radicales que el principio de relatividad a la Einstein introduce en nuestra visión de la realidad física. Bástenos decir que las distancias se achican en la dirección del movimiento del observador y que los intervalos de tiempo se alargan al medirlos desde un sistema de referencia que se mueve. Al primer efecto se le conoce como la contracción de Lorentz[1] y al segundo se le llama la dilatación del tiempo. Asimismo, la simultaneidad de dos eventos es relativa: lo que para un observador ocurre al mismo tiempo, para otro que esté en movimiento uniforme respecto al primero, puede ocurrir antes o después; el tiempo absoluto ha cedido su lugar a una velocidad (la de la luz) absoluta.

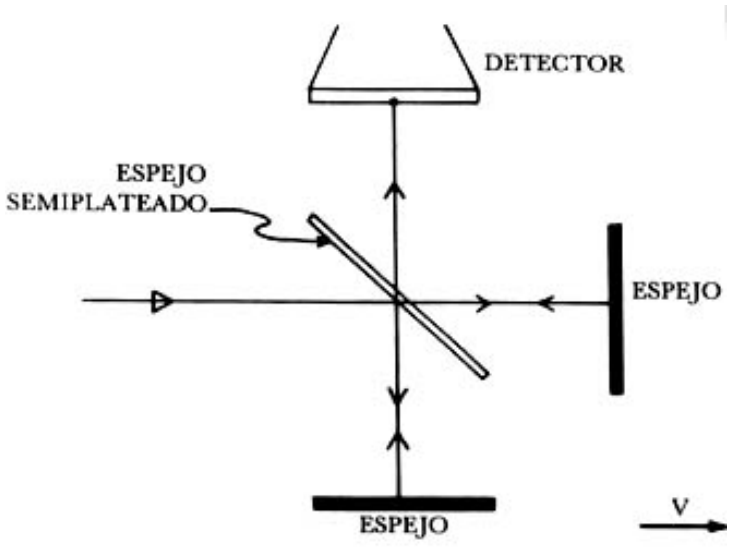

Figura 10. En el experimento de Michelson y Morley se fuerza a la luz a seguir dos caminos distintos

antes de llegar al mismo punto. El tiempo de recorrido es el mismo, sin importar cuál sea la velocidad de la Tierra.

También es importante señalar que la dinámica de Einstein es diferente a la dinámica de Newton. La masa, a diferencia de la carga eléctrica, no es una invariante relativista, y puede transformarse en energía de acuerdo a la famosa relación de Einstein

$$E = mc^2,$$

donde *m* es la masa de la partícula en reposo, es decir, medida en un laboratorio en que se halle quieta.

Con el nuevo principio de relatividad, la invariancia de carga y la ley de Coulomb a la mano, podemos ya retornar al estudio de cargas eléctricas en movimiento.

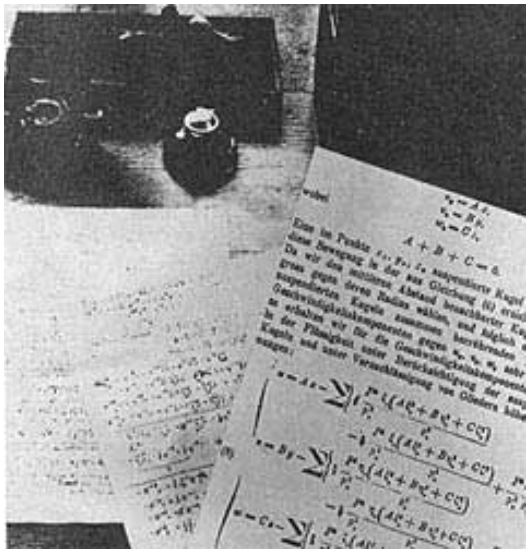

Figura 11. Mesa de trabajo de Albert Einstein.

NOTAS

1 Hendrik Antoon Lorentz, físico holandés, uno de esos científicos a los que el público conoce poco, fue uno de los grandes pensadores de principios de siglo. Para entender el resultado negativo del experimento de Michelson y Morley postuló la contracción de los cuerpos en movimiento. También se dio cuenta del cambio de la masa con la velocidad. Hacia 1900, esto había sido comprobado experimentalmente. Cinco anos después, Einstein dio solidez a las ideas de Lorentz.

X. EL CAMPO MAGNÉTICO

CUANDO una carga se mueve frente a un alambre cargado, la densidad de carga positiva en el alambre ya no es igual a la densidad de las partículas negativas. En efecto, la distancia entre iones positivos se contrae de manera diferente a la forma en que lo hace la distancia entre los electrones, y la densidad de carga cambia, todo ello visto desde la carga testigo. Ésta siente, pues, una fuerza eléctrica causada por la contracción de Lorentz. Resumimos lo anterior diciendo que una corriente eléctrica origina un nuevo tipo de campo, el campo magnético, que actúa sobre cargas que se mueven en la vecindad de las corrientes, produciendo una fuerza, la fuerza magnética. Tal y como hicimos con el campo eléctrico, podemos dibujar el campo magnético. En la Figura 12 se ven las líneas de campo magnético producidas por un alambre recto con corriente. En el caso magnético, a diferencia del eléctrico, la fuerza sobre una partícula testigo que se mueve es perpendicular a las líneas del campo, como también se indica en la figura.

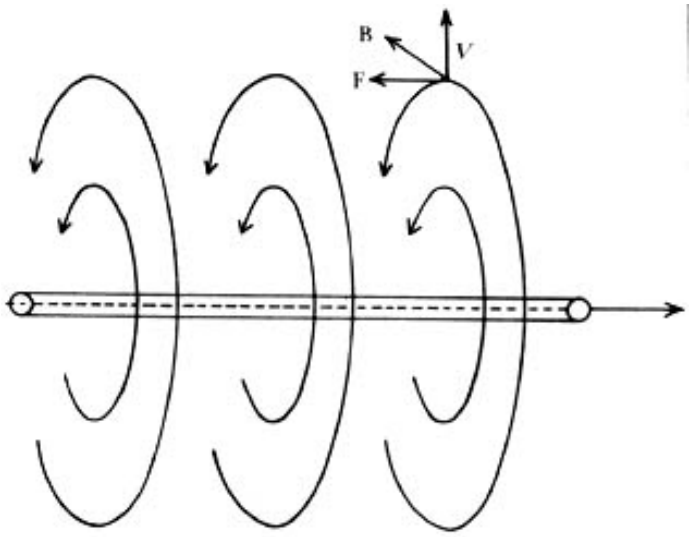

Figura 12. Las líneas de campo magnético que circundan un alambre recto que conduce corriente.

Si en la teoría de la relatividad dejamos que la velocidad de la luz tome un valor grandísimo, casi infinito, volvemos a la mecánica de Newton. El tiempo absoluto recobra su lugar en la descripción física y la contracción de Lorentz es pequeñísima, despreciable para todo propósito práctico. El principio de relatividad a la Einstein se vuelve el de Galileo y los efectos relativistas son minúsculos. Como la velocidad de la luz es enorme, en nuestra vida diaria aparenta ser infinita. De ahí que un habitante común y corriente no se percate de la relatividad en su vida cotidiana.

Según vimos, los efectos magnéticos tienen su origen en la contracción de Lorentz y son, por tanto, de carácter relativista. ¿Por qué, entonces, podemos usar en nuestro mundo los campos magnéticos, como lo hacemos al orientarnos usando una brújula o al utilizar el giro de un motor eléctrico? Parece que contradecimos lo que justo acabamos de decir en el párrafo anterior: el campo magnético es un efecto relativista y éstos no se sienten en la vida diaria; no obstante, todos hemos jugado alguna vez con un imán. La razón es simple, y radica en la neutralidad de la materia. La pequeña interacción magnética se deja sentir porque la que sería una acción muchísimo mayor del campo eléctrico no existe, pues la materia es neutra eléctricamente. Si, por ejemplo, en los alambres del experimento hubiera un solo tipo de cargas, y no dos con signos opuestos que se neutralicen como ocurre en la naturaleza, ¡los alambres se repelerían con una fuerza eléctrica 10^{20} veces mayor que la magnética! Pero el caso es que la materia es neutra y los efectos magnéticos son perceptibles.

El campo magnético tiene propiedades diferentes al eléctrico. Este se crea por la presencia de una carga eléctrica; aquél sólo existe cuando hay una corriente eléctrica, es decir, cargas en movimiento. Lo anterior se refleja en la distinta naturaleza de las líneas de uno y otro campo. Si comparamos las del campo

eléctrico, como aquellas que se ven en la Figura 7, con las del campo magnético, como se muestran en la Figura 12, vemos que en las primeras existen puntos de convergencia donde todo se origina, mientras que las del campo magnético no tienen principio ni fin. En un caso existe la fuente del campo —que es la carga eléctrica— y en el otro no: el análogo de esta fuente no se ha encontrado.

El monopolo magnético no es necesario para explicar lo que sabemos de las propiedades eléctricas y magnéticas de la materia. Pero si existiera, las líneas de campo producidas por la carga magnética serían como se indican en la Figura 13, que en su parte *a* muestra el campo *magnético* producido por un monopolo en reposo, y en su parte *b*, el campo *eléctrico* que genera el monopolo al moverse. Las palabras "eléctrico" y "magnético" se intercambian al pensar en el monopolo magnético en vez de la carga eléctrica, y la total simetría en nuestra imagen de los fenómenos electromagnéticos quedaría a salvo.

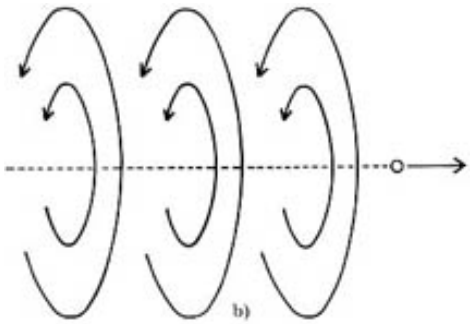

Figura 13. Un monopolo magnético, de existir, produciría un campo magnético como el que se ve en la parte *a*; al moverse, el monopolo estaría rodeado por un campo eléctrico semejante al que se muestra en la parte*b*de esta figura.

XI. MAXWELL, UN GENIO SINTÉTICO

ANTES de introducirnos a los terrenos de la mecánica cuántica y así poder entender la idea que Dirac tuvo al proponer el monopolo magnético, es conveniente relatar lo que el gran físico escocés, James Clerk Maxwell, logró al sintetizar en una sola teoría todo lo que se sabía a mediados del siglo XIX sobre la electricidad y el magnetismo. De la síntesis maxwelliana surgen nuevos conceptos, como las ondas electromagnéticas, ubicuas en nuestra sociedad tecnológica moderna.

Figura 14. James C. Maxwell (1831-1879)

Como Newton antes que él y Dirac 70 años más tarde, Maxwell fue educado en Cambridge. Y como ellos, Maxwell también hizo muchas contribuciones notables a la ciencia, desde explicar la estructura de los anillos de Saturno hasta sentar las bases de la teoría cinética de los gases. Sin embargo, su logro fundamental fue la teoría electromagnética, cuyas cuatro leyes —magistralmente expresadas en otras tantas ecuaciones de belleza y simplicidad impresionantes— forman junto con las tres leyes de Newton y las leyes de la termodinámica la esencia de la física clásica. Para ese entonces ya Maxwell había dejado la Universidad de Aberdeen y aceptado, con todos los peros del caso, una cátedra como profesor de física experimental en Cambridge. Allí organizó el Laboratorio Cavendish, el cual dirigió hasta su muerte acaecida a causa del cáncer a los 48 años de edad.

En lo que hemos expuesto hasta aquí, ya hemos tropezado con tres de las cuatro leyes de Maxwell. Tenemos, por un lado, la ley de Coulomb (o, en su forma modificada, la ley de Gauss) que relaciona al campo eléctrico con su fuente, la carga o monopolo eléctrico. Conocemos, por el otro, la ley de Ampère, que resume una buena cantidad de experimentos al decir que las cargas en movimiento generan un campo magnético. Y, finalmente, sabemos ya que el análogo magnético de la carga eléctrica no se ha encontrado: el monopolo magnético hasta hoy se nos ha escondido.

Las tres leyes anteriores, la de Gauss, la de Ampere y la que postula la inexistencia del monopolo magnético, tienen algo en común: en ellas el tiempo interviene de una manera muy particular, sólo a través del concepto de corriente eléctrica. Así, una carga estacionaria genera un campo eléctrico, una carga que se mueve de manera uniforme produce un campo magnético, pero ¿qué ocurre con un campo magnético que varía en el tiempo? La respuesta a esta pregunta la dio otro científico inglés, tal vez el físico y químico experimental más hábil de la historia: Michael Faraday.

En un abrir y cerrar de ojos, Faraday pasó de encuadernador a ayudante de laboratorio en la Royal Institution de Londres. Luego de dedicarse a la electroquímica y de enunciar en 1832 las que hoy se conocen como las leyes de Faraday para la electrólisis, el físico y químico inglés inventó el motor eléctrico

y el transformador; al colocar limaduras de fierro cerca de un imán, mostró vívidamente las líneas de fuerza magnética, con lo cual concibió por primera vez la idea de campo, que tantas veces hemos mencionado y que sigue vigente hoy en día. Una de sus labores favoritas era impartir conferencias de ciencia para el público en general. En una de estas pláticas encontró, para él mismo y para el público, el que habría de ser su descubrimiento fundamental: insertó un imán en una bobina de alambre que había conectado a un galvanómetro; cuando movía el imán, el aparato indicaba que una corriente fluía por la bobina. Faraday descubrió así la inducción eléctrica y con ella el eslabón que faltaba para que Maxwell emprendiera su síntesis.

Tenemos, pues, que un campo magnético variable en el tiempo genera un campo eléctrico, que a su vez engendra la corriente en un circuito. Maxwell postuló que lo recíproco también es cierto: un campo eléctrico que cambia temporalmente crea un campo magnético, y agregó esta causa como origen del campo, además de la ya encontrada por Ampère. Por su analogía con la corriente eléctrica que aparece en la ley según Ampère la formuló, Maxwell bautizó al nuevo término como la corriente de desplazamiento, y así se le conoce hasta el presente.

$$\nabla \bullet \mathbf{E} = 4\pi\rho \qquad -\frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \nabla \times \mathbf{B} = \frac{4\pi}{c}\mathbf{j}$$

$$\nabla \bullet \mathbf{B} = 0 \qquad -\frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \nabla \times \mathbf{E} = 0$$

Figura 15. Por el solo placer de mostrar una belleza fría como la de las matemáticas, he aquí las cuatro ecuaciones de Maxwell.

Estaba ya todo preparado para la gran síntesis, que no se hizo esperar. El clímax de la teoría electromagnética habría de llegar con la publicación del trabajo *Dynamical Theory of the Electromagnetic Fleid* por James C. Maxwell. Desde que los chinos descubrieron la brújula y los griegos frotaron el ámbar, los fenómenos eléctricos y magnéticos preocuparon al hombre. Estos fenómenos habían sido muchas veces considerados sobrenaturales, manifestación de la ira divina. Tenía que llegar el Siglo de las Luces para que un puñado de brillantes científicos ingleses y franceses establecieran las leyes, válidas aún hoy, de la electricidad y del magnetismo.

Repetimos: Charles Coulomb descubrió la fuerza eléctrica; André Marie Ampère, otro físico y matemático francés, encontró que una corriente eléctrica produce un campo magnético. Michael Faraday, inglés, descubrió la inducción electromagnética, por la que se genera una corriente eléctrica en un circuito cuando se le sujeta a un campo magnético variable. Así, como una vez el mismo Faraday dijo, "se convertía al magnetismo en electricidad, se cerraba un ciclo y se unían los fenómenos eléctricos con los magnéticos". Las leyes que los rigen muestran una sola asimetría: no existe el monopolo magnético, pues al partir un imán con dos polos obtenemos siempre otros de la misma naturaleza.

Tan sólo cuatro décadas después del descubrimiento de Faraday, Maxwell hace suya la idea del campo también propuesta por Faraday, e introduce la corriente de desplazamiento. Postula que en todo punto del espacio que rodea a cargas e imanes existen dos campos, el eléctrico y el magnético; al cambiar uno cualquiera de ellos en el tiempo, se generan cambios en el otro. Esto permite un proceso que puede mantenerse por sí solo, sin que sea necesaria la presencia cercana de cargas, de corrientes o de imanes: un campo magnético variable da origen a uno eléctrico; cuando éste último varía, se origina otro magnético, y así sucesivamente. Tenemos, pues, un proceso autosostenido que puede propagarse aun en la ausencia de cargas es decir, en el vacío. Estas son las ondas electromagnéticas que Maxwell predijo y que Hertz descubrió.

XII. LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

EN 1888, el profesor Rudolf Hertz, que trabajaba en la Universidad de Kiel, hizo saltar chispas a voluntad en un pequeño aro de alambre con un intersticio al colocarlo cerca de un circuito eléctrico oscilante, en el cual también podía producir chispas. La corriente variable en el circuito oscilante daba origen a campos eléctricos y magnéticos que se propagaban y luego eran detectados en el aro: así fueron descubiertas las "ondas hertzianas" que no eran otras que las ondas electromagnéticas predichas poco antes por Maxwell. En Italia se demostró, no mucho tiempo después del trabajo de Hertz, que estas ondas se reflejaban, se refractaban, podían polarizarse y sufrir interferencia, de la misma manera que la luz. Maxwell lo afirma: "Es difícil no inferir que la luz consista de oscilaciones transversas del mismo medio que es la causa de los fenómenos eléctricos y magnéticos." Aunque para Maxwell este medio es el éter, sabemos ahora que las ondas electromagnéticas pueden propagarse en el vacío y el éter resulta innecesario.

Cuando Hertz hacía saltar chispas en su aro, en realidad forzaba grandes aceleraciones sobre algunas cargas eléctricas. De acuerdo a la teoría electromagnética, esto genera impulsos que viajan con la velocidad de la luz. En otras palabras, una carga eléctrica acelerada genera una onda electromagnética. En particular, si la carga da vueltas alrededor de un centro con una cierta frecuencia, las "ondas que emite tienen esa misma frecuencia. La carga, al radiar energía electromagnética, consume parte de su energía mecánica.

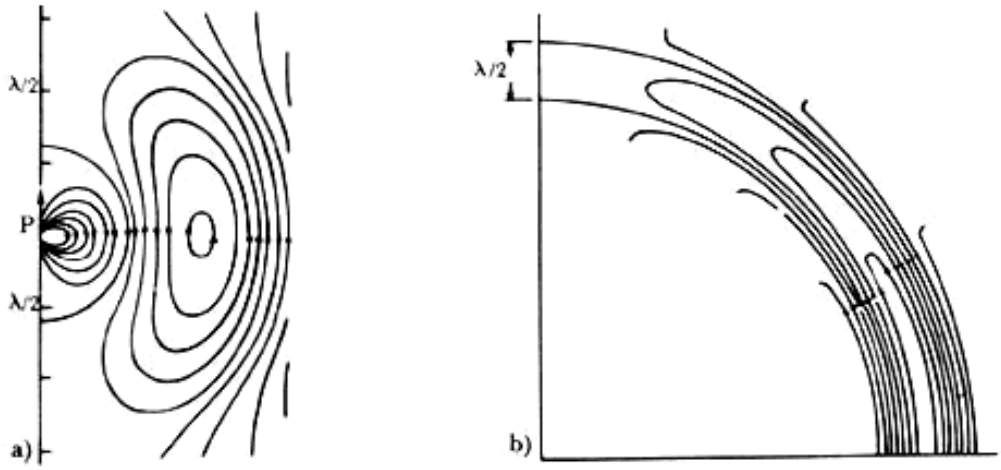

Figura 16. Cuando una carga eléctrica se acelera, genera radiación electromagnética. En *a* se ven las líneas de campo eléctrico en la región cercana, y en *b* en la región lejana cuando un dipolo eléctrico oscila.

El experimento de Hertz fue convertido en un aparato de uso práctico para enviar mensajes por el ingeniero italiano Guillermo Marconi. Conectó a tierra tanto el receptor como el transmisor y utilizó un alambre aislado como antena para facilitar lo mismo la transmisión que la recepción de las señales. Poco a poco consiguió enviar sus mensajes a distancias cada vez más grandes, hasta que en 1901 logró comunicación entre el sur de Inglaterra y Terranova, a través del Atlántico. Con ello se establece la telegrafía inalámbrica, o radiotelegrafía (es decir, telegrafía por radiación a diferencia de telegrafía por medio de alambres, con corrientes eléctricas), la cual pronto evolucionaría del código Morse a otros más complicados; así nacen la radio y la televisión.

La historia de las ondas electromagnéticas proporciona un bello ejemplo de las ligas que unen a la ciencia básica con la aplicada y a ésta con el desarrollo tecnológico. La teoría —en este caso las ecuaciones de Maxwell— predice un cierto fenómeno, comprobado luego experimentalmente en el laboratorio. Con ello se genera un nuevo conjunto conceptual —la teoría electromagnética de la luz—, pero también se busca la

aplicación práctica de las nuevas ideas. Se inventan así el telégrafo inalámbrico, el radio, y tantos otros aparatos que hoy son indispensables para que el hombre moderno subsista. A su vez, cada nuevo desarrollo tecnológico sugiere nuevos experimentos —como ha ocurrido en las dos últimas décadas con el láser— y éstos plantean nuevos esquemas teóricos, que también predicen nuevos fenómenos comprobables experimentalmente. Esta red complicada de teorías, observaciones controladas e inventos constituye la esencia del avance científico y tecnológico, base de la sociedad industrial de nuestros días.

XIII. LA LUZ Y LA ESTRUCTURA DE LA MATERIA

APROXIMADAMENTE setenta años después de que Coulomb inventara la balanza de torsión, hace su aparición en la ciencia otro aparato que habría de ocupar un lugar de gran prominencia: el espectroscopio de Kirchhoff y Bunsen. El primer espectroscopio, que consistía de un prisma, una cajetilla de cigarros a la cual se le había recortado en su base una rendija, los extremos de dos viejos telescopios y una fuente de luz (un mechero de Bunsen), fue inventado en 1854 cuando estos dos científicos alemanes trabajaban en Heidelberg. Se colocaba una muestra del material que se deseaba estudiar en el mechero de Bunsen y se le calentaba hasta que estuviera incandescente. La luz que emitía se refractaba en el prisma, y luego pasaba por la rendija. Puesto que los diferentes colores se refractaban en el prisma de manera diversa, al mover los telescopios podía verse la imagen de la rendija con diferentes colores. Con este simple aparato, pronto descubrió Kirchhoff que cada elemento químico —cuya existencia, para ese entonces, comenzaba a establecerse firmemente gracias a los esfuerzos de Lavoisier, Proust, Dalton y tantos otros— produce al ser calentado un conjunto de líneas de colores que le es característico. Así, por ejemplo, el vapor de sodio incandescente emite una doble línea amarilla y el hidrógeno marca su presencia por una serie de líneas (la llamada serie de Balmer), cuyo espaciamiento disminuye a medida que su color se acerca más al azul. A estas líneas de colores, que son una especie de huella digital del elemento químico, se le llamó el espectro de ese elemento.

Con su espectroscopio, Bunsen y Kirchhoff pronto descubrieron nuevos elementos, el cesio en 1860 y el rubidio un año después. Kirchhoff descubrió también la ley que hoy lleva su nombre, según la cual un gas absorbe luz de la misma longitud de onda que emite al estar incandescente. De aquí dedujo la presencia de sodio en el Sol, así como de una docena de elementos más. El espectroscopio se convierte, pues, en un poderoso instrumento analítico que nos permite enterarnos de la constitución de las estrellas y, mucho más importante aún, nos da la llave para entrar en el mundo fabuloso de los átomos.

Además de jugar con su espectroscopio, Kirchhoff planteó también otro problema —el llamado cuerpo negro, que es el absorbedor de luz más perfecto—, cuyo comportamiento habría de constituir un gran enigma para los físicos del siglo XIX. La teoría clásica de la luz, basada en las leyes de Maxwell, unida a las leyes de la termodinámica, no es capaz de explicar la radiación del cuerpo negro. Tendría que venir un alumno de Kirchhoff, Max Planck, para explicarnos los misterios del cuerpo negro y establecer así las primicias de la teoría cuántica.

Como ya hemos dicho, un cuerpo negro absorbe todas las ondas que inciden sobre él, sin importar la frecuencia de esa radiación. Aunque el cuerpo negro perfecto no existe, se puede construir uno que casi lo sea mediante el simple truco de hacer un pequeño agujero en una caja cerrada con sus paredes interiores pintadas de negro; la luz que penetre por el agujerito tendría una probabilidad pequeñísima, casi despreciable, de volver a salir por la apertura: de hecho ha sido absorbida y el sistema se comporta como si fuera negro. Si ahora forzáramos el proceso inverso, calentando la caja hasta la incandescencia, del agujero saldría luz (o más precisamente, radiación electromagnética) de todas las longitudes de onda. De hecho, si el radiador negro emitiera en todas las frecuencias por igual, casi toda la energía se iría al radiar en la región de más alta frecuencia. Ya que la luz de mayor frecuencia en el espectro visible es la violeta, esta conclusión de la física clásica se llegó a conocer como "la catástrofe ultravioleta". La tal catástrofe nunca fue observada en el experimento, y se constituyó así en la catástrofe de la física clásica.

XIV. EVOLUCIÓN DE LA TEORÍA CUÁNTICA

CON SUS investigaciones sobre los espectros atómicos y su planteamiento del problema del cuerpo negro, Kirchhoff preparó el entierro de la física clásica, la basada en las leyes de Newton y Maxwell, y abrió la puerta a una nueva física, la física cuántica, vigente hasta nuestros días.

La teoría cuántica avanza en saltos bien definidos y en treinta años se convierte en la firme base de la física moderna. Con su ayuda podemos contestar a preguntas tan variadas como ¿por qué hay algunos materiales que son conductores y otros que son aislantes?, o ¿podría haber en la Tierra una montaña muchísimo más alta que el Monte Everest?, así como otras muchas que nos explican el comportamiento de la materia en bulto; también podemos abordar cuestiones más fundamentales, que van desde las reacciones químicas hasta aquellas que tienen lugar en el Sol y lo proveen de energía, o llegar a entender la constitución del núcleo de los átomos, o incluso formular una imagen de los entes más fundamentales, las llamadas partículas elementales.

Los saltos cruciales para establecer la física cuántica se debieron al trabajo de un puñado de científicos. Max Planck, en la Navidad de 1900, propuso la existencia del "cuanto" para resolver la catástrofe ultravioleta; vino luego Einstein, quien en 1905 (el mismo año en que postuló el principio de relatividad y entendió el movimiento browniano) explicó el efecto fotoeléctrico, para lo cual supuso que la luz está formada por corpúsculos, que se llaman fotones; Niels Bohr, físico danés cuyo centenario celebramos en 1985 aplicó en 1913 las ideas cuánticas para entender el espectro del átomo de hidrógeno, en particular la serie de Balmer; el físico y noble francés Louis de Broglie propuso en 1923 que a toda partícula debe asociarse una onda, cuya longitud de onda es inversamente proporcional a su velocidad; finalmente, en 1924, Erwin Schrödinger, austriaco, desarrolló la mecánica ondulatoria y estableció su ecuación, y Werner Heisenberg, alemán, creó la llamada mecánica de matrices y postuló el fundamental principio de incertidumbre. Con la interpretación probabilística de la mecánica cuántica, sugerida por Max Born, la formulación del principio de exclusión por Wolfgang Pauli en 1925, y los intentos de Dirac para unir la nueva mecánica con la teoría especial de la relatividad, la concepción cuántica de la naturaleza quedaría esencialmente completa y lista para ser aplicada a una casi inimaginable variedad de fenómenos. Veamos ahora en detalle la historia de estos saltos cuánticos, empezando por el principio.

Índice | Anterior | Previo

XV. TERMODINÁMICA Y MECÁNICA ESTADÍSTICA

EN VARIAS ocasiones hemos mencionado la legislación de la física clásica, formada por las leyes de Newton y de Maxwell. Estas ocho leyes —las tres que rigen el movimiento de una partícula y la ley de gravitación universal así como las leyes de Coulomb, Ampère, Faraday y la que postula la inexistencia del monopolo magnético— constituyen, en principio, un conjunto completo de reglas para entender el comportamiento de los cuerpos materiales. Sin embargo, un selecto grupo de ingenieros, químicos y físicos, allá por los albores de la Revolución Industrial, se dio cuenta de que al estudiar los procesos que ocurren con la materia en bulto es conveniente trabajar con nuevos conceptos, ajenos a la mecánica clásica de Newton, que tan exitosa había sido al tratar el movimiento de partículas aisladas, como los planetas que giran alrededor del Sol, por ejemplo. Se creó así una nueva ciencia, la termodinámica, que tiene un pie en la química y otro en la física. En poco más de un siglo, quedaron firmemente establecidas sus tres leyes, que son de aplicación muy general.

Las leyes de la termodinámica son tres: la ley cero, la primera y la segunda. Esta curiosa nomenclatura se debe a que los científicos se dieron cuenta tardíamente de la necesidad de postular lo que hoy se conoce como la ley cero: si un sistema está en equilibrio con otros dos, estos últimos, a su vez, también están en equilibrio. Cuando los sistemas pueden intercambiar calor, la ley cero postula que la temperatura es una variable de estado, y que la condición para que dos sistemas estén en equilibrio térmico es que se hallen a igual temperatura.

La primera ley, por su parte, establece que la energía interna es también una variable de estado. La energía interna es la suma de las energías provenientes de todas las interacciones que sufre un sistema: por un lado, tenemos el trabajo mecánico que se realiza cuando dos sistemas interactúan por medio de una fuerza; por otro lado, se tiene el intercambio de calor o el de masa, que también puede producirse. Si en un sistema ocurre un proceso que lo lleva de un estado de equilibrio a otro, el trabajo realizado y el calor transferido pueden tomar un valor diferente, según el tipo de procesos que ocurran y el orden en que éstos se realicen. Un cuerpo macroscópico no acumula calor o trabajo. Empero, si se acumula la suma de trabajo y calor: decimos que la energía interna total es una variable de estado. Nótese que lo anterior lleva implícita la ley de conservación de la energía.

La segunda ley de la termodinámica se puede enunciar de muchas formas, todas equivalentes: existe un límite para la eficiencia de cualquier máquina térmica; el calor no puede fluir espontáneamente de un sistema frío a otro caliente; la entropía, que mide el desorden dentro del sistema, es una variable de estado y nunca disminuye en un sistema aislado. En más de un sentido, la primera ley nos dice que no podemos salir ganando y la segunda que ni siquiera saldremos a mano.

Una consecuencia importante de la segunda ley y de jugar con abstracciones como la máquina de Carnot (que es aquélla de máxima eficiencia) es la siguiente: existe una escala absoluta de temperatura, que no depende del tipo de termómetro que empleemos para medirla sino que está anclada en una ley de la naturaleza.

Como ya dijimos, estas tres leyes de la termodinámica son muy generales. En ellas no se hace referencia alguna a las peculiaridades del sistema, con tal que sea macroscópico. Desde luego, la relación entre unas variables de estado termodinámicas y otras es diferente según la estructura particular del sistema: la relación entre presión, volumen y temperatura para un gas ideal difiere de la relación entre estas variables para un líquido. Esta relación entre variables termodinámicas, que se llama la ecuación de estado, es peculiar a cada sistema, pero los procesos termodinámicos se rigen por las mismas leyes sin importar en qué sistema ocurran.

Las leyes de la termodinámica y las ecuaciones de estado plantean un reto formidable a los físicos, pues éstos insisten siempre en disectar a los sistemas, considerándolos como formados por otros más pequeños,

que son entonces numerosos. Así, los físicos piensan en un gas como el conjunto de muchas moléculas puntuales que se mueven sin interactuar casi; o formulan un modelo para un líquido, como un número enorme de esferas rígidas que chocan entre sí; y estudian a los sólidos cuando se imaginan a todas las moléculas unidas por resortes, que no pueden encogerse o estirarse mucho. El problema matemático que se plantea es complejísimo: sólo escribir la posición y la velocidad de las 10^{23} partículas que contiene un mol de una substancia requeriría una cantidad de papel inimaginable. Más difícil aún sería resolver las ecuaciones de Newton y de Maxwell para obtener las predicciones de la física clásica sobre el comportamiento de estos sistemas macroscópicos. Es necesario, claramente, hallar un enfoque distinto. Este nuevo enfoque del problema se vuelve urgente al fijarnos en uno de tantos enunciados de la segunda ley de la termodinámica, ya que los sistemas formados por muchísimos cuerpos evolucionan en el tiempo siguiendo una dirección privilegiada, como si existiera la flecha del tiempo, pues la entropía en un sistema aislado o aumenta o se mantiene constante, pero nunca decrece. Esta flecha en el tiempo, esta evolución preferente en el tiempo, no existen en las ecuaciones de Newton. En ellas, el tiempo sólo ocurre en la aceleración, y ésta no cambia al invertir el sentido del tiempo, cuando en lugar de ir hacia el futuro, el sistema se adentra en el pasado. He aquí, pues, una gran paradoja: de un comportamiento reversible en el tiempo, en que no existe ninguna dirección privilegiada, ha de extraerse la flecha del tiempo implícita en la segunda ley de la termodinámica.

Todo lo anterior llevó a Boltzmann a inventar la teoría cinética moderna y a Gibbs y a Einstein la mecánica estadística; estas dos ciencias intentan fundamentar la termodinámica desde un punto de vista microscópico. Al introducir conceptos estadísticos —en los que sólo se define la probabilidad de que las variables dinámicas tomen ciertos valores y se deja de lado el interés por conocer en detalle la posición y la velocidad de cada molécula— se resuelve el problema práctico que antes mencionamos y se da pie a introducir postulados de un carácter ajeno a la mecánica clásica, para justificar así la segunda ley de la termodinámica desde una perspectiva que ya no es meramente fenomenológica. En buena. medida, la termodinámica pasa entonces a formar parte de la llamada física clásica.

XVI. PLANCK Y LA CATÁSTROFE ULTRAVIOLETA

EN EL breve recuento que hicimos de la mecánica estadística sugerimos, tal vez, la idea de que los subsistemas eran siempre partículas en movimiento. Ésta es una inferencia errónea, pues los métodos de la mecánica estadística son más generales. Se pueden aplicar, por ejemplo, a las ondas electromagnéticas que oscilan en el interior de una cavidad, como aquella que imaginó Kirchhoff al tratar la radiación del cuerpo negro. Éste es también un sistema termodinámico, susceptible de análisis con las técnicas estadísticas. La conclusión de este análisis fue ¡la existencia del cuanto!

Herman Helmholtz (1821-1894), Rudolf Clausius (1822-1888) y Gustav Kirchhoff (1824-1887) tuvieron muchas cosas en común. Además de ser físicos alemanes contemporáneos y de haber hecho contribuciones fundamentales a la termodinámica —a Helmholtz debemos la primera ley, a Clausius la segunda y de las hazañas de Kirchhoff ya hemos hablado—, los tres fueron profesores de la Universidad de Berlín y ahí dejaron una gran tradición, que habrían de heredar dos de sus alumnos, Wien y Planck.

El primero de ellos, Wien, obtuvo su doctorado con Helmholtz y poco después empezó a trabajar en el problema de la radiación del cuerpo negro. Observándola encontró que las longitudes de onda de la radiación electromagnética emitida se distribuyen de una manera que no es uniforme, sino que su intensidad presenta un pico en un valor intermedio, como se muestra en la Figura 17.

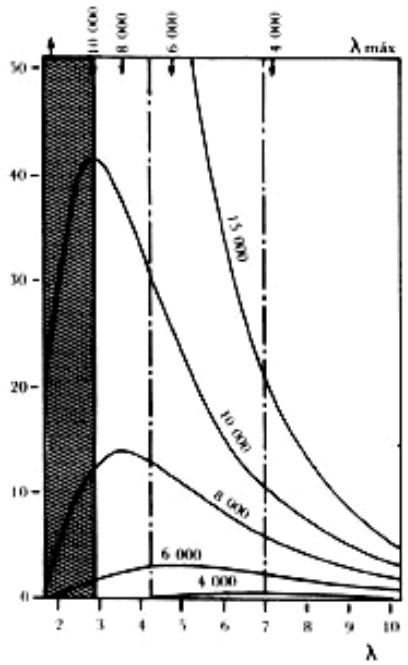

Figura 17. Intensidad de la radiación electromagnética emitida por un cuerpo negro. Se observa un pico en la intensidad para una longitud de onda intermedia.

La longitud de onda en el pico de la curva varía inversamente con la temperatura, de tal forma que a medida que ésta aumenta el color predominante se corre hacia el azul. A esta propiedad se le llama la ley del desplazamiento de Wien, quien pudo deducirla con puro razonamiento termodinámico. Para ello supuso que en la cavidad del cuerpo negro existe un conjunto de ondas electromagnéticas que ejercen presión sobre las paredes de esa cavidad. Con este mismo modelo, lord Rayleigh pudo explicar la forma de la curva en la figura para frecuencias pequeñas; Wien mismo lo hizo cuando esas frecuencias son grandes, aunque ninguno de los dos pudo obtener de la mecánica estadística la forma completa de la curva. El cálculo de Rayleigh, correcto según los cánones de la física clásica, predecía una intensidad que siempre crecía con la frecuencia, como el cuadrado de ésta. En consecuencia, la energía total radiada es infinita y

nos hallamos frente a una verdadera catástrofe ultravioleta.

Aunque primero realizó estudios sobre la física y la música, pronto Planck siguió la tradición establecida en Berlín por sus ilustres maestros y se dedicó a analizar problemas termodinámicos. Emplea el mismo modelo que lord Rayleigh y elige un simple oscilador armónico cargado (es decir, una carga que oscila sujeta a un resorte) para simular la emisión de luz. Con ello deduce de inmediato que la intensidad emitida a una cierta frecuencia se determina por dos factores: el primero, proporcional al cuadrado de la frecuencia, y el segundo, a la energía promedio contenida en el oscilador. El primer factor es equivalente a la ley de Rayleigh; el segundo, la energía promedio, es proporcional a la temperatura absoluta de la cavidad y la constante de proporcionalidad es, de acuerdo con un teorema general que Boltzmann probó en la mecánica estadística clásica, una constante universal *k*, que hoy llamamos la constante de Boltzmann. Con ello Planck obtiene un resultado acorde con la ley de Wien y con la catástrofe ultravioleta. Estas conclusiones de la mecánica y el electromagnetismo clásicos son inevitables.

Para eliminar esa catástrofe, Planck se vio forzado a una medida extrema y audaz. Al calcular la energía promedio en cada oscilador, abandonó las recetas de Boltzmann y postuló que las energías del oscilador sólo vienen en paquetes, que él denominó cuantos. La energía sólo puede ser múltiplo de una energía fundamental, ϵ_0, que es la de un paquete. Con esta suposición tan revolucionaria, Planck pudo explicar los resultados de la Figura 17, eliminando así la catástrofe ultravioleta. Al mismo tiempo, cerró el capítulo clásico de la física y abrió el que dominaría a esta ciencia durante el siglo XX: el capítulo de la física cuántica.

XVII. EINSTEIN Y EL EFECTO FOTOELÉCTRICO

PARA que su cálculo fuera consistente con la ley de Wien —que es un resultado de la termodinámica, y por ello independiente de los detalles del modelo empleado—, Max Planck tuvo que suponer que la energía ϵ_0 es proporcional a la frecuencia ***v***:

$$\epsilon_0 = h\nu$$

Así entra en la física la constante *h*, hoy llamada constante de Planck, que es ubicua en la física moderna. El valor de *h*, cuando usamos el sistema de unidades centímetro-gramo-segundo (que es apropiado al tratar con los sistemas físicos que hallamos cotidianamente) es pequeñísimo: $\boldsymbol{h = 6.62 \times 10^{-27}}$ **erg.**seg. Por ello, en el estudio de muchos fenómenos que ocurren en objetos a la escala del hombre o mayores, *h* aparenta ser cero. En tal caso, la energía ya no viene en cuantos, sino que parece ser continua, como en la mecánica de Newton. Recuperamos así, como un caso límite en que la constante de Planck es cero, la física clásica. De manera análoga a como la mecánica newtoniana se obtenía de la física relativista cuando la velocidad de la luz se considera infinita, la física clásica es un caso limítrofe de la cuántica si *h* puede despreciarse. En la vida diaria, cuando los cuerpos se mueven a velocidades muy pequeñas respecto a la luz y tienen masas muy grandes, los efectos relativistas y cuánticos no pueden observarse. Las leyes de Newton, como un caso límitrofe, recuperan su valor y son útiles para describir el movimiento de proyectiles, ciclones y planetas. Pero en el mundo de lo muy pequeño, *h* es siempre diferente de cero y su presencia se hace sentir en múltiples fenómenos.

Uno de estos fenómenos es el efecto fotoeléctrico. Supongamos que se ilumina con luz ultravioleta la superficie de un metal alcalino; se observa que esta superficie adquiere carga positiva, porque ha dejado escapar electrones. Podemos luego medir la velocidad y el número de esos electrones. Se observa que el número aumenta con la intensidad de la luz pero que su velocidad sólo depende de la frecuencia de ésta. En particular, si la frecuencia se hace muy pequeña, la luz incidente no es capaz de producir la corriente fotoeléctrica, es decir, no puede arrancar electrones al metal por más intensa que sea.

En uno más de los artículos fundamentales que Einstein publicó en 1905 (año en que, por cierto, también obtuvo su doctorado), se generaliza la idea de los cuantos de luz para explicar estos experimentos sobre fotoelectricidad. Einstein, a diferencia de Planck, no sólo postuló las características cuánticas de la luz durante los procesos de emisión y absorción, sino que supuso que la luz está formada por cuantos de energía igual al producto de *h* por la frecuencia, que vuelan a la velocidad de la luz. A estos cuantos se les llamaría fotones, las partículas de la luz. Con esta hipótesis cuántica, la explicación del efecto fotoeléctrico es fácil: un fotón choca con un electrón y lo expulsa del metal si la energía que le da es mayor que la llamada función de trabajo; mientras más fotones haya, más electrones pueden ser extraídos del metal, pero la energía de estas partículas sólo depende de la que originalmente tenga el fotón y no del número de éstos. La corriente fotoeléctrica depende, por consiguiente, de la intensidad de la luz, pero la energía de los electrones sólo de la frecuencia de la radiación incidente. Con su audaz concepción corpuscular de la luz, Einstein golpea brutalmente, por segunda vez, a la física clásica.

XVIII. EL ÁTOMO DE BOHR

EL SIGUIENTE salto en la historia de los cuantos lo dio Niels Bohr en 1911 al postular la idea del salto cuántico para explicar por qué los espectros atómicos existen. La historia del modelo atómico de Bohr es como sigue.

J. J. Thomson y su discípulo Ernest Rutherford descubrieron, respectivamente, el electrón y el núcleo de los átomos. Con estos ingredientes, se propuso un modelo planetario y clásico para el átomo, que sería un pequeño sistema solar, con el núcleo en el papel del Sol y una nube de electrones circundándolo, como si fueran los planetas. Tal modelo conduce, por lo menos, a dos consecuencias desagradables.

La primera de esas consecuencias es verdaderamente catastrófica: el modelo planetario y la física clásica predicen que los átomos son inestables. En efecto, como ya mencionamos, un electrón cargado que da vueltas alrededor del núcleo emite ondas electromagnéticas, cuya frecuencia es la del movimiento del electrón al recorrer su órbita y cuya energía proviene de la energía mecánica de la partícula. El electrón pierde, pues, su energía en forma continua y cae irremisiblemente al núcleo. La teoría electromagnética de Maxwell predice que, en un tiempo pequeñísimo, la nube electrónica —y con ella el átomo— habría desaparecido. La materia, de acuerdo a la física clásica, sería inestable.

La segunda consecuencia del modelo planetario clásico es igualmente desagradable y, como la primera, también inevitable si aceptamos las leyes de Newton y de Maxwell. Cuando el electrón radia y pierde su energía mecánica, cada vez se mueve más despacio, recorriendo su órbita con una frecuencia que disminuye continuamente. Por ello emitiría, según la teoría clásica, radiación electromagnética de todas las frecuencias y no luz con un espectro discreto. Los espectros de Kirchhoff y la serie de Balmer constituyen un enigma que la física clásica no puede resolver.

Al terminar sus estudios de doctorado en Copenhague, Bohr decide estudiar en Inglaterra, en el Cavendish, bajo la dirección de J. J. Thomson. Muy pronto, Bohr propone que la mecánica clásica no funciona dentro del átomo, sino que éste sólo puede existir en un conjunto discreto de estados estacionarios con energías E_0, E_1,E_2 ..... .; cuando un electrón se encuentra en uno de ellos, no puede emitir ni absorber radiación; estos procesos se dan cuando el átomo pasa de uno de esos estados estacionarios a otros y la frecuencia de la luz necesaria obedece a la ecuación

$$En - Em = hvnm,$$

es decir, sólo radia aquellos cuantos cuya frecuencia es tal que se conserva la energía.

Los grandes físicos de la vieja generación —nuestro ya conocido Rayleigh y el mismo maestro de Bohr, J. J. Thomson— se opusieron al nuevo modelo del joven danés. Por esta razón, entre otras, Bohr deja el Cavendish y va a trabajar con Rutherford en Manchester, donde en 1913 completa el nuevo esquema atómico, acorde con las ideas cuánticas de Planck y Einstein, pero violentamente opuesto a la mecánica de Newton.

Con su modelo, Bohr pudo explicar la serie de Balmer y aun predecir lo que ocurriría al bombardear átomos con electrones de baja energía: si ésta fuera menor que la diferencia E_1 - E_0, es decir, la mínima energía requerida para excitar el átomo, el electrón no podría comunicar a éste excitación alguna. Esta concepción, ajena por completo a las ideas clásicas cuando se aplican al choque entre partículas, fue comprobada por los científicos alemanes James Franck y Gustav Hertz (este último sobrino de Rudolf Hertz), quienes alrededor de 1920 bombardearon gases y vapores con electrones de diferentes energías. Cuando la energía no es suficiente para que un cuanto completo se absorba, el electrón rebota elásticamente y no se emite luz. El modelo atómico de Bohr, aunque no es muy satisfactorio desde el punto de vista teórico, recibió así un fuerte impulso.

XIX. LA DUALIDAD PARTÍCULA-ONDA

CUANDO una onda electromagnética de frecuencia *v* incide sobre un electrón, lo fuerza a oscilar con esa misma frecuencia. Según vimos, el electrón se convierte en una antena que radia con la misma frecuencia que oscila. Ésta es una más de las consecuencias inevitables de unir a la mecánica con el electromagnetismo clásicos. Por ello resultó apasionante ver cómo Compton, al dispersar rayos X con un bloque de parafina, midió una radiación emergente cuya frecuencia era menor a la de los rayos X originales. Si se aceptan los principios de la teoría ondulatoria de Maxwell, el efecto descubierto por Compton resulta incomprensible.

El efecto Compton —encontrado por este físico americano en 1922 para los rayos X, y luego ratificado por el investigador hindú, Chandrasekhar Raman, para la luz visible— puede, sin embargo, entenderse si se adopta un modelo corpuscular para la luz. Al chocar el cuanto de luz, cuya energía es *hv*, cede parte de su energía al electrón libre, por lo que su energía se convierte en ***hv'*** después del choque; la conservación de la energía nos fuerza a concluir que *v'* es menor que la frecuencia original. De hecho, si se usa la dinámica relativista —como se impone, ya que de haber una partícula muy rápida, ésta sería el fotón—, es posible explicar, aun cuantitativamente, los resultados experimentales de Compton. Una vez más, como en la radiación del cuerpo negro y en el efecto fotoeléctrico, aparecen los fotones y se reafirma, para la luz, la dualidad partícula-onda.

Al reflexionar un momento, pronto se percata uno de cuán irracional es esta dualidad. No es extraño que un físico ortodoxo de principios de siglo protestara cuando alguien tratara de unir conceptos antagónicos como el de onda y el de partícula. En la concepción clásica, esta última es un punto-masa con energía e impulso lineal muy definidos y de dimensiones pequeñísimas; la onda, por su parte, se extiende al infinito en el espacio y el tiempo.

La paradoja anterior no arredró a Louis de Broglie, quien en su tesis doctoral, presentada en la Sorbona en 1925, fue más allá y postuló que la misma dualidad partícula-onda que aquejaba a la luz se halla presente cuando se trata de electrones, protones y otras partículas de pequeña masa. De Broglie insistió en que a toda partícula de masa ***m*** debe asociarse una onda, cuya longitud de onda X es inversamente proporcional al ímpetu ***p = mv*** de la partícula. Como en todos los efectos cuánticos, la constante de proporcionalidad es la constante de Planck:

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{p}$$

Mientras mayor sea la masa de la partícula, menor será la longitud de la onda asociada, hasta que desaparece cuando de cuerpos macroscópicos se trata. Todo ocurre como, si en tal caso, la constante de Planck fuera cero y las predicciones de la mecánica clásica se recuperaran.

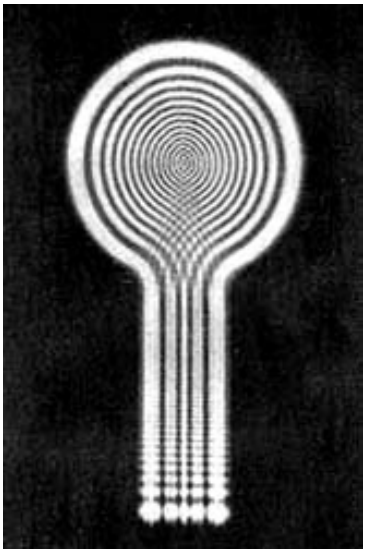

Figura 18. Patrones de difracción. a) Agujero en forma de ojo de cerradura.

Una propuesta audaz como la de De Broglie no puede entrar a la física sin antes ser objeto de los inquisidores. ¿Cómo puede sujetarse la hipótesis ondulatoria del físico francés a la prueba experimental? Einstein mismo encontró la primera prueba, pues la idea de Louis de Broglie resultaba necesaria para entender los valores experimentales del calor especifico de los sólidos Una demostración más directa la dieron, sin embargo, Davisson y Germer que descubrieron por accidente la difracción de electrones en 1927. Cuando estudiaban la forma en que se reflejaban los electrones después de chocar con un blanco de níquel metálico dentro de un tubo al vacío, el tubo se dañó y rápidamente se depositó una capa de óxido sobre el níquel. Para salvar su muestra, los físicos americanos la recalentaron, con lo cual, sin saberlo, formaron superficies cristalinas. Al observar luego los electrones, hallaron para su sorpresa que el haz de electrones no sólo se reflejaba sino que también ¡se difractaba! Y la difracción es uno de esos fenómenos típicamente ondulatorios, según sabían los físicos desde muchas décadas antes.

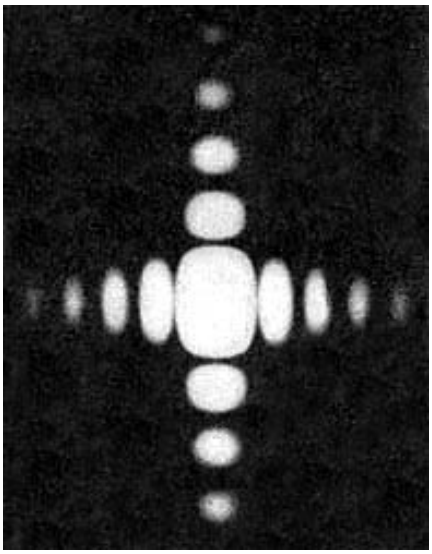

Figura 18. b) Apertura cuadrada.

Con este descubrimiento, no solamente se arraigan las ideas ondulatorias en la física moderna, sino también se abren nuevas posibilidades para ver objetos muy pequeños. La difracción de electrones es la base de la microscopía electrónica, hoy presente en muchísimos laboratorios de biología, química e ingeniería.

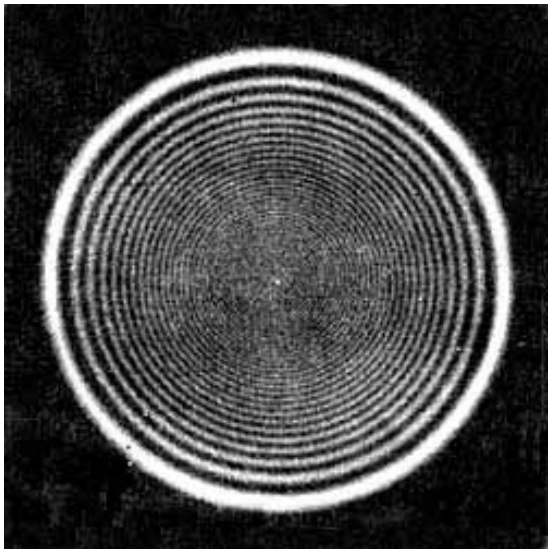

Figura 18. c) Rayos X contra una hoja de aluminio.

El experimento de Davisson fue confirmado por George Thomson —hijo único de sir J. J. Thomson— en el caso de electrones, por Stern para haces moleculares y por otros investigadores para neutrones y otras partículas. En todos los casos, la ecuación de De Broglie se cumple con alta precisión, con lo cual la mecánica ondulatoria de Schrödinger pudo finalmente aparecer.

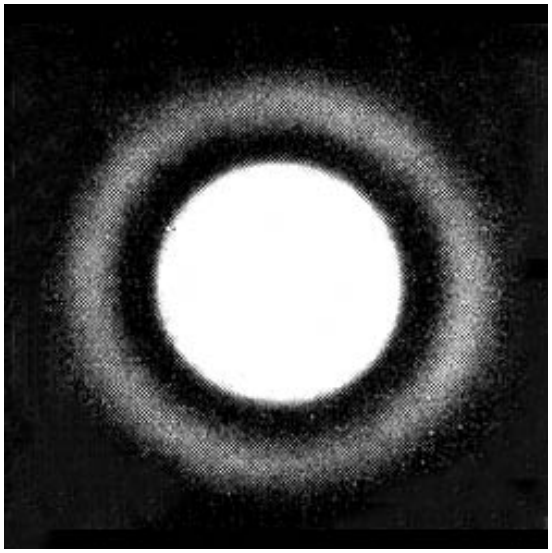

Figura 18. d) Electrones contra una hoja de aluminio.

XX. LA MECÁNICA CUÁNTICA

SI ACEPTAMOS las ideas de Louis de Broglie y a cada partícula le asociamos una onda con $\lambda = h/p$, nada hay más natural que aplicarlas también a los electrones dentro del átomo, digamos a una órbita circular. Nos hallamos entonces frente a un dilema, a menos que un número entero de longitudes de onda cubra toda la circunferencia. De otra forma, no podríamos asociar unívocamente un valor definido de la onda a cada punto. Ello implica que sólo un conjunto discreto de longitudes de onda, y de ahí sólo valores discretos del ímpetu, sean posibles. Nos acercamos así a las órbitas de Bohr, necesarias para explicar el espectro discreto del átomo de hidrógeno.

Ideas como la expuesta en el párrafo anterior llevaron a Erwin Schrödinger, físico austriaco, a proponer la mecánica ondulatoria. Cuando se enteró —al leer un trabajo de Einstein— de las ideas de Louis de Broglie, se le ocurrió tomarlas en cuenta para enfocar el modelo atómico de Bohr desde otro ángulo. Al imaginar que las ondas fueran estacionarias, podríamos pensar que representan una carga sin aceleración que, por lo tanto, no radia. Todo ello condujo a Schrödinger a su ecuación, que sería la ecuación básica de la mecánica cuántica no-relativista.

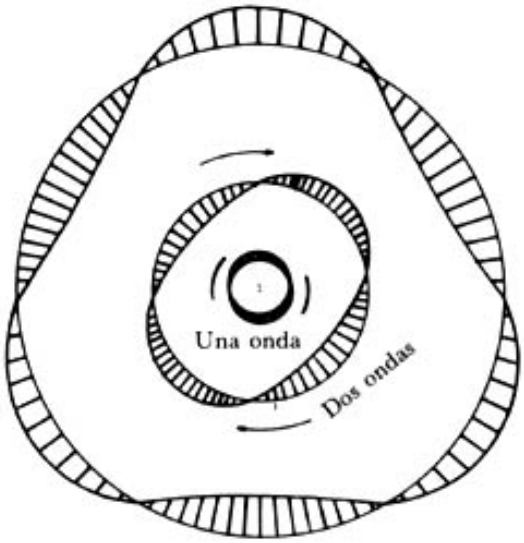

Figura 19. Ondas estacionarias

Antes de Schrödinger y de De Broglie nos enfrentábamos a la dualidad partícula-onda de la luz; después de ellos, esta dualidad era omnipresente en el mundo microscópico. Para entender algunos experimentos —como el fotoeléctrico o el de Compton en el caso de la luz—, debíamos pensar en partículas; otras veces —como en aquellas situaciones donde hay interferencia—, hablaríamos de una onda. A veces pensamos en una partícula y su trayectoria, lo que implica suponer que la posición y el ímpetu lineal del sistema se pueden conocer con tanta precisión como deseemos; otras veces hablamos de una onda, con su longitud de onda y su frecuencia bien definidas, y que puede difractarse o sufrir interferencia. Todo ello no ocurre cuando se observa el movimiento de los cuerpos grandes, como proyectiles, trenes o planetas. Algo debe haber en el mundo de las partículas pequeñas que se nos ha escapado.

Otro maestro de los experimentos pensados encontró la pieza faltante. En 1927, un joven físico alemán, W. Heisenberg, que por aquel entonces tenía apenas 26 años, formuló el principio de incertidumbre, según el cual es imposible determinar al mismo tiempo la posición y el ímpetu de cualquier cuerpo. Su razonamiento sigue esta línea: Al hacer una partícula más y más pequeña, la hacemos más y más sensible a perturbaciones. Cuando observamos una partícula, debemos verla en alguna forma y para ello es necesario iluminarla con luz de frecuencia apropiada. Mientras más pequeña sea la partícula requerimos luz de longitud de onda menor y, por lo tanto, de mayor frecuencia. Lo anterior implica usar fotones cada vez más energéticos, que deben rebotar en la partícula para luego llegar a nuestro ojo, al microscopio o a

cualquier otro detector que empleemos. Por tanto, la velocidad de la partícula sufre cambios cada vez mayores, pues la colisión con los fotones la altera más. A medida que deseemos determinar mejor la posición, la velocidad de la partícula será más imprecisa. De hecho, según el principio de Heisenberg, el producto de los errores con que podemos medir posición e ímpetu de una partícula tiene un mínimo, que es inherente a la naturaleza. Este valor mínimo está dado por la constante de Planck*h*.

El principio de Heisenberg destruye el concepto de partícula (y, desde luego, el de órbita) y por lo tanto resuelve la paradoja partícula-onda. Antes de Heisenberg teníamos una situación que recuerda a aquella que existía antes de Einstein y su teoría de la relatividad. Nunca pensaron los físicos de finales del siglo XIX en cuestionar lo absoluto del tiempo, ni imaginaron que la simultaneidad de dos eventos fuera relativa al observador. En la misma forma que Einstein sujetó a una dura crítica los conceptos sobre el tiempo que se creían válidos, Heisenberg destazó las ideas en boga sobre partículas y ondas. Su principio destruyó las ideas clásicas de partículas y de onda, como antes lo había hecho la teoría de la relatividad de Einstein con el tiempo absoluto. Los conceptos de ondas y partículas son habituales en nuestro mundo cotidiano —porque en él vemos cuerpos grandes y lentos— pero en el mundo microscópico se reducen a una mera forma de hablar y ya no son aplicables a los procesos atómicos o nucleares.

Incluso antes de formular su fundamental principio, Heisenberg había encontrado un camino para entender el modelo de Bohr, camino que a primera vista es diferente al marcado por Schrödinger. Al usar únicamente cantidades observables, Heisenberg fundó la mecánica de matrices; no nos detendremos en ella pues pronto se demostró que sus conclusiones eran idénticas a las que pueden obtenerse de la ecuación de Schrödinger. La mecánica de matrices de Heisenberg y la mecánica ondulatoria de Schrödinger son, pues, dos maneras equivalentes de formular lo que hoy llamamos la mecánica cuántica.

En la mecánica cuántica no caben ya las trayectorias que siguen las partículas clásicas. Se les ha cambiado por las soluciones de la ecuación de Schrödinger, que por comodidad seguiremos llamando ondas. ¿Cómo es que estas ondas de Schrödinger reemplazan al viejo concepto de órbita? La respuesta a esta crucial pregunta la dio Max Born, poco después de la invención de la mecánica cuántica. Según Born, el cuadrado del valor absoluto de la solución ψ de la ecuación de Schrödinger da la probabilidad de encontrar a la partícula. En aquellas regiones del espacio en que ψ sea nula, es imposible hallar a la partícula; donde la amplitud de ψ no es cero, sabemos que es probable encontrarla, aunque no con certeza absoluta. El principio de incertidumbre, que está incluido en la ecuación de Schrödinger, ha destruido el determinismo clásico. En otros términos, la mecánica cuántica es una teoría probabilística, donde la forma de ψ en el espacio tiene consecuencias importantes.

XXI. SOBRE ÁTOMOS, MONTAÑAS Y ESTRELLAS

EL TÍTULO de este capítulo es el de un bello artículo de Victor Weisskopf, publicado en el número 4177 de la revista *Science*, donde aplica cualitativamente las ideas cuánticas para responder a una multitud de preguntas, desde por qué una roca tiene la dureza que la caracteriza, hasta por qué el Sol es tan grande. Como una muestra de cómo razonan los físicos cuánticos, vale la pena aquí inspirarse en ese articulo y resumirlo libremente. No obstante, la gracia del trabajo de Weisskopf sólo podrá apreciarse con su lectura completa. La historia del monopolo puede entenderse sin leer este párrafo y el siguiente. Quien no quiera hacerlo, puede pasar al capítulo "A manera de resumen" sin perder continuidad en la lectura.

Uno de los grandes logros de la física cuántica, sin duda la revolución científica más importante del siglo XX, es poder entender el comportamiento y las propiedades de la materia en las formas en que habitualmente la encontramos: Hoy sabemos que los fenómenos materiales que ocurren en las condiciones terrestres normales son consecuencias cuánticas de la interacción entre electrones y núcleos o de la atracción gravitacional entre objetos masivos. Si lo anterior es cierto, las propiedades de la materia deben poder expresarse —al menos en orden de magnitud— en términos de unas cuantas constantes fundamentales. En las relaciones que hallaremos pueden aparecer la masa del electrón *m* y la del protón *M*, así como la constante gravitacional *G* introducida por Newton; también es posible la presencia de *e*, la carga elemental, y de la velocidad de la luz *c* , pues ellas determinan las interacciones electromagnéticas. Finalmente, debe aparecer *h*, la constante de Planck, pues la teoría básica será la cuántica. (Desde luego, cuando tratemos con un elemento químico particular, podrán aparecer los valores del número atómico *Z* y el número de masa *A*; *Z* y *A* son números enteros que dan, respectivamente, la carga *Ze* y la masa *MA* del núcleo del átomo correspondiente.)

Además de las relaciones básicas $\boldsymbol{p = h/\lambda}$ *y* $\boldsymbol{E = h\nu}$, que conectan el ímpetu $\boldsymbol{p}$ y la energía $\boldsymbol{E}$ de la partícula con la longitud de onda λ y la frecuencia $\boldsymbol{\nu}$ de la onda asociada, haremos uso en lo que sigue de tres hechos básicos derivados de la mecánica cuántica:

1) Cuando se confina una onda en una región finita del espacio, se genera un conjunto de ondas estacionarias, cuyas formas y frecuencias responden a la naturaleza del confinamiento. Las formas más simples corresponden a las frecuencias más bajas, y de ahí a las menores energías. Con la mecánica cuántica hace su entrada a la física "la forma de las cosas" conectada con la existencia de los estados estacionarios, herederos de las órbitas de Bohr. Las formas específicas no tenían cabida en la física clásica, y por ello la teoría cuántica se necesita para explicar lo que vemos en la naturaleza, tan llena de formas distintas y características, desde los cristales a las flores.

2) Otra propiedad ligada al confinamiento de ondas es la siguiente: una onda confinada sólo puede tener longitudes de onda de tamaño comparable o menor que la dimensión lineal *R* característica del confinamiento. A la longitud de onda máxima, $\lambda_{max} \sim R$, corresponde el ímpetu mínimo de una partícula de masa $\boldsymbol{m}$. De ahí que la energía cinética menor sea del orden de $T_0 \sim \hbar^2/2m R^2$, que se hace mayor mientras más pequeño sea el confinamiento; por eso un electrón no puede estar en reposo cuando se le confina. A las partículas les gusta tener la mínima energía posible, por lo que ejercen una presión sobre las paredes que las confinan, tratando de moverse en una cavidad de mayor volumen. Esta presión $\boldsymbol{P_s}$, que Weisskopf llama la presión de Schrödinger pues surge de su ecuación, varía como $ps \sim \hbar^2/m R^5$, fórmula que resulta al ver cómo cambia T^0 con el volumen $\boldsymbol{V}$ del confinador: $R \sim V^{1/3}$. (Nótese que en todas estas fórmulas factores como $(4\pi/3)^{1/3}$, que son del orden de la unidad, no se consideran: estamos haciendo un estudio en física cualitativa.)

3) El tercero de los hechos básicos que se usarán aquí es el principio de exclusión de Pauli. La forma de expresar este principio es no convencional;[1] decimos que si en el volumen *V* confinamos *N* partículas (y

no una como antes) que obedezcan al principio de exclusión, la energía cinética mínima será $T_0 \sim \hbar^2/2m\,d^2$, donde $d = (V/N)^{1/3}$ es la dimensión lineal de un volumen que es **N** veces menor que el de confinamiento. Es como si cada partícula tuviera su propio volumen privado, su propio territorio que defiende de las demás. Como consecuencia de este valor para T^0 , la presión de Schrödinger correspondiente a **N** partículas no es **N** veces la que resulta de una de ellas, sino que el factor es $N^{5/3}$: $Ps \sim (\hbar/m).(N/V)^{5/3}$. Si no fuera por el principio de Pauli, los electrones atómicos buscarían todos —y lo conseguirían— el mismo estado dentro del átomo. Todos los átomos tendrían entonces las mismas propiedades, y el mundo sería muy poco interesante. En buena. media, la diversidad de la naturaleza se debe al principio de exclusión.

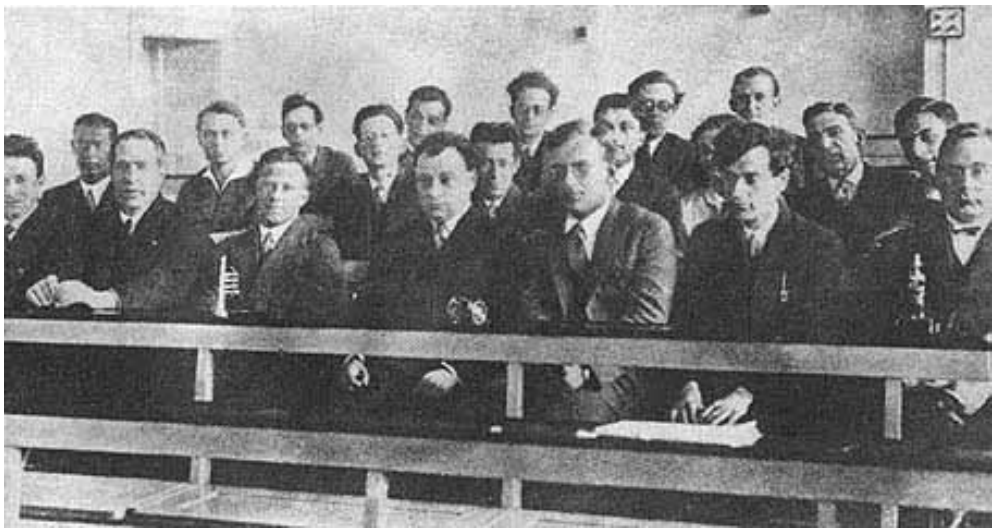

Figura 20. Bohr, Heinserberg, Pauli, Gamow, Landau en el Instituto de Niels Bohr en Copenhague.

Si a estos tres hechos agregamos el principio de mínima energía, según el cual los sistemas cuánticos buscan estar en aquel estado cuya energía total adquiera el menor valor posible compatible con el postulado de De Broglie, el principio de incertidumbre de Heisenberg y de exclusión de Pauli, obtenemos de inmediato órdenes de magnitud para muchos fenómenos físicos.

NOTAS

1 Para explicar el tamaño de los átomos pesados, el joven prodigio Wolfgang Pauli, nacido en Viena en 1900, postuló en 1925 que sólo un electrón puede hallarse en cada estado cuántico. Es decir; si un electrón tiene una cierta energía y otras propiedades mecánicas que caractericen a una solución de la ecuación de Schrödinger, otro electrón no cabe ahí. Puesto que obedecen a este principio de exclusión, los electrones pertenecen a un tipo de partículas llamadas fermiones, que son muy poco sociables y repelen a sus semejantes. Es importante hacer notar aquí que los electrones tienen una propiedad intrínseca, llamada espín, que es, una especie de rotación intrínseca y que puede orientarse de dos diferentes maneras. El estado cuántico del electrón contiene también la orientación del espín.

XXII. UN ESTUDIO EN FÍSICA CUALITATIVA

APLIQUEMOS estas ideas para calcular en forma aproximada el tamaño de los átomos. Si pensamos en el átomo más simple, el de hidrógeno, vemos que la atracción eléctrica del protón que constituye el núcleo busca confinar al electrón que da vueltas a su alrededor. Dos efectos contrarios entran en acción: la fuerza electrostática que atrae al electrón al núcleo y la presión de Schrödinger que impide el confinamiento de esa partícula. La presión de Schrödinger debe contrarrestar la presión que ejerce la fuerza de Coulomb. Esta última es igual a la fuerza $\mathbf{e^2/R^2}$ entre protón y electrón dividida por el área de una esfera de radio **R:** $\mathbf{4\pi R^2}$. Si nos olvidamos de factores como 4p y otros de ese mismo orden, tenemos que $\mathbf{R \sim \hbar^2/me^2}$, cantidad que se conoce como el radio de Bohr $\mathbf{a^0}$ y vale medio Angstrom. Éste es, en efecto, el tamaño típico de un átomo, que puede medirse experimentalmente. Para átomos más pesados que el hidrógeno, que tienen varios electrones orbitando alrededor del núcleo, el radio atómico puede escribirse como $\mathbf{fa^0}$, donde el factor *f* crece con el número de masa.

Con este solo dato, ya podemos responder a una pregunta interesante: ¿Cuál es la densidad típica de un sólido, como un metal o una roca? La densidad se obtiene como la masa por unidad de volumen. En la materia compacta los átomos o moléculas se acomodan uno al lado del otro. La densidad será entonces *AM* dividida por $\mathbf{f^3\ (4\pi\ a^{03})/3}$. Si se toman los valores de ***f,*** que varían ligeramente con ***A***, se obtienen valores entre **1 y 10 g/cm³**, que son los que medimos en la naturaleza.

De la misma manera se puede determinar la dureza de los sólidos, predecir su resistencia a la compresión cuando se les aprieta. Para la gran mayoría de los sólidos, se requiere una presión entre cien mil y un millón de atmósferas para reducir de manera apreciable el volumen de un pedazo de roca o de metal. Este número puede obtenerse de la presión de Schrödinger que ejerce el gas de electrones que deambula entre los iones. Si se hace esto, obtenemos efectivamente los valores correctos, en orden de magnitud.

Veamos ahora dos problemas en que compiten las fuerzas eléctricas y las gravitacionales. El primero nos permite entender porqué en la Tierra las montañas son tan altas como son, y en el segundo veremos que la longitud de onda de las olitas que el aire forma en la superficie de un lago no toma cualquier valor sino, lo que es más, ¡es del orden de la raíz cuadrada de la altura de una montaña, si ambas longitudes se expresan en función del radio de Bohr!

Cuando el peso del bloque del óxido de silicio —modelo que elegimos para la montaña en discusión— es tan grande que el material en su base empieza a fluir, la montaña empezará a sumirse; en este punto la montaña alcanza su altura máxima *H.* Cuando esto sucede, la energía gravitacional que gana el bloque al sumirse iguala la energía que se requiere para engendrar flujo plástico. Esta última energía es cercana (aunque tal vez menor) a la que se necesita para licuar la roca; si *B* es la energía de amarre de una molécula, la energía de licuefacción $\boldsymbol{E_1}$ es del orden de ***B/20***. Esto es así ya que al licuar no se rompen las ligaduras entre los átomos que forman la molécula, sino que sólo se elimina la rigidez direccional de los amarres. Como *B* es una cierta fracción de la energía de amarre $\mathbf{E_0}$ del átomo de hidrógeno, digamos $\beta = \gamma\ \mathbf{E_0}$, obtenemos $\mathbf{AMHg = \zeta\gamma E_0}$ como la condición energética que fija la altura máxima; cada una de las moléculas que forman el bloque, que tienen masa *AM*, se sumen una altura ***H***, ganan energía ***AMHg*** y la gastan en licuarse. Los factores ζ **=1/20 y** γ**= 0.2** son apropiados para las rocas; con ***A*** **~50,** que es un valor cercano al del hierro y al del óxido de silicio, las dos substancias que son típicas en la tierra sólida, obtenemos una altura ***H*** del orden de 26 kilómetros. En realidad, todo el mundo sabe que en nuestro planeta esta altura es cercana a los l0km. Hemos obtenido un número mayor al usar *B* tal cual y no la energía para engendrar el flujo plástico, que debe ser menor a la de licuefacción.

Podemos ir más allá y escribir ***H*** en función de $\mathbf{a_0}$, el radio de Bohr; también expresamos ***g***, la aceleración de la gravedad en la superficie terrestre, en términos de la constante de la gravitación universal *G* y de la masa y radio de la Tierra. Vemos que entonces *H* varía con el inverso del cubo del número de protones y

neutrones que tiene nuestro planeta. Predecimos que en Marte las montañas tendrían el doble de altura que en la Tierra, lo que sucede en la realidad. También podríamos predecir que un planeta en que las montañas son parecidas a su radio —es decir, un planeta cuya forma dista mucho de ser esférica, a pesar de la gravedad— no puede exceder los 300 km en sus dimensiones lineales. Esta predicción se cumple en una de las dos lunas de Marte.

El segundo problema que mencionamos no tiene, en apariencia, conexión alguna con calcular la altura de una montaña. No obstante, el tamaño de las ondas en un lago también representa un balance entre las fuerzas eléctricas a nivel atómico y la gravedad. El viento excita primero aquellas ondas que tienen una velocidad de propagación mínima. Según la hidrodinámica, estas ondas tienen una longitud de onda λ cuyo cuadrado es proporcional a la tensión superficial δ y varía inversamente con el peso específico **g**. La tensión superficial es la energía por unidad de área que se origina porque en la superficie del líquido una molécula está menos amarrada que en el bulto del material. Si llamamos $\mathbf{E_s}$ a esta energía, $\mathbf{E_s \sim B/6}$, pues una de las seis ligaduras ha desaparecido. Si ahora se divide $\mathbf{E_s}$ por el área de la molécula obtenemos $\delta \sim \mathbf{E_s/4p\ f^2 a_0^2}$, con lo cual podemos expresar l en términos de constantes atómicas y gravitacionales. Resulta algo impresionante: $\mathbf{(\lambda/a_0)^2 \sim H/a_0}$, así que el tamaño de las olitas es del orden de la raíz cuadrada de las montañas, si se expresa en unidades del radio de Bohr.

Con estos ejemplos dejamos el artículo de Weisskopf sobre física cualitativa y resumiremos lo que hemos aprendido sobre el electromagnetismo, la relatividad y la mecánica cuántica. Luego estaremos ya listos para entender qué es un monopolo magnético de Dirac.

XXIII. A MANERA DE RESUMEN

EL ESTUDIO de cargas eléctricas en reposo y en movimiento uniforme nos indujo a considerar dos tipos de campos de fuerza, los eléctricos y los magnéticos. Si suponemos que el principio de relatividad de Einstein, la invariancia de carga y la ley de Coulomb son válidos, podemos entender el origen relativista de las fuerzas magnéticas. El campo magnético se produce porque las distancias se contraen cuando se las observa en movimiento y ello causa un desequilibrio entre las densidades de carga positiva y carga negativa dentro de un alambre, según las ve un observador (una carga) en movimiento. En pocas palabras, y contrariamente a lo que ocurre con la fuerza eléctrica, el origen del campo magnético no se debe a la existencia de polos magnéticos: en la electrodinámica clásica el monopolo magnético no es necesario, aunque nada prohibe su existencia.

La ley de Gauss (o la de Coulomb) nos dice el campo eléctrico que genera un conjunto de cargas eléctricas; la ley de Ampère modificada con la corriente de desplazamiento nos indica que las cargas en movimiento y los campos eléctricos variables en el tiempo producen un campo magnético y la ley de Faraday, a su vez, muestra cómo un campo magnético que varía en el tiempo induce un campo eléctrico. Si a estas tres leyes agregamos la inexistencia del monopolo magnético, tenemos las cuatro ecuaciones de Maxwell, base de la teoría electromagnética clásica.

Ya escribimos, por el mero placer de mostrar la belleza de las matemáticas, estas cuatro ecuaciones en la Figura 15, donde usamos el lenguaje del cálculo vectorial. Es posible escribirlas también en la notación de la relatividad especial, notación con la cual las cuatro ecuaciones se convierten en un par de relaciones y resalta aun más su asimetría. Los símbolos $\mathbf{F}_{\mu\nu}$, y $\mathbf{F}^{+}_{\mu\nu}$, que se ven en la Figura 21, designan las varias componentes de los campos eléctricos y magnéticos y el símbolo ∂ denota la operación matemática que permite ver cómo cambian $\mathbf{F}$ y $\mathbf{F}^{+}$ con las coordenadas espaciales y el tiempo. Por otro lado, jm está ligada a la corriente y a la densidad de carga eléctricas. Un término equivalente a éste no existe en la segunda ecuación. Por ello las ecuaciones no son simétricas: una tiene un lado derecho diferente de cero, en la otra el lado derecho es nulo. Si el monopolo magnético existiera, este último cero debería reemplazarse por un término para representar a la corriente magnética.

$$\partial_{\mu} \mathbf{F}^{\mu\nu} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}^{\nu} ; \partial^{\bar{\nu}} \mathbf{F}^{+}_{\mu\nu} = 0$$

Figura 21. Ecuaciones de Maxwell en notación relativista.

Las ecuaciones de Maxwell serían totalmente simétricas, también, donde $\mathbf{j}_{\mu}$ fuera cero, es decir, donde las cargas y corrientes eléctricas no existieran. Por definición misma del vacío (clásico), esto ocurre ahí. Las ecuaciones predicen que una onda electromagnética puede transmitirse en el vacío: sin necesidad de un medio material que los sustente, los campos eléctricos y magnéticos que varían en el tiempo se mantienen uno al otro. De aquí surge la teoría electromagnética de la luz.

Esta teoría clásica tuvo (y continúa teniendo) grandes logros, pero también sufrió tropiezos fuertes. Al mismo tiempo que Hertz descubría las ondas electromagnéticas y Marconi las ponía al servicio de la humanidad, otros físicos la cuestionaban. Al unir la teoría de Maxwell a la termodinámica se produce la catástrofe ultravioleta; con la mecánica clásica, sus predicciones sobre el efecto fotoeléctrico, el espectro de los átomos y el efecto Compton son erróneas. Todo ello llevó a un puñado de físicos (la mayoría muy jóvenes) a construir en menos de 30 años una nueva física.

La mecánica cuántica, a diferencia de la clásica, es una teoría probabilística, donde las soluciones de las

ecuaciones básicas sólo dan la probabilidad de que el sistema físico se halle en un estado u otro, pero nunca con certeza absoluta. La nueva física ha logrado explicar una enorme variedad de fenómenos con unos cuantos principios a la mano. Con ella hemos entendido las propiedades de los sólidos y se ha logrado dominar a los semiconductores, cuya influencia en la microelectrónica —y de ahí en nuestra sociedad industrial—, todo el mundo conoce. Con la teoría cuántica nos hemos adentrado en los misterios del núcleo atómico y lo hemos convertido en una fuente de energía que será, esperamos, limpia y segura a finales de este siglo. Con la física cuántica también hemos explorado el mundo subnuclear, el de las partículas elementales, tan pequeñas y veloces. Aunque mucho se ha avanzado en este terreno, el matrimonio de lo cuántico y lo relativista todavía no resulta tan armonioso como era de desearse. En fin, la física cuántica ha sido puesta a prueba en miles de experimentos, en infinidad de cálculos y ha dado origen a enormes desarrollos tecnológicos, como los transistores, los láseres, los reactores nucleares o los superconductores. Aunque seguramente no es la teoría física final, es sin duda el caballo de batalla de la ciencia hoy en día.

XXIV. EL MONOPOLO MAGNÉTICO DE DIRAC

A PESAR de que el electromagnetismo clásico funciona muy bien bajo la suposición de que no hay monopolos magnéticos, nada hay en la física clásica que prohiba su existencia. ¿Será esto cierto en la física cuántica o habrá en ella algún obstáculo para el monopolo? Ésta es la pregunta que Paul Dirac se planteó en 1931 y a la que dio una respuesta por demás ingeniosa. Dirac halló algo más, pues demostró que de existir una carga magnética aislada, se encontraría la respuesta a una vieja incógnita de la física moderna: ¿por qué todas las partículas elementales que podemos observar aisladas tienen una carga que es múltiplo entero de la del electrón?

El razonamiento de Dirac, en su más pura usanza, es un claro ejemplo del pensamiento matemático aplicado a la física. Es una manifestación clara, también, de la creencia de Dirac según la cual incluso es mejor tener belleza en las ecuaciones de la física que ajustar los datos experimentales. No obstante, puede omitirse lo que sigue y, sin perder continuidad en la lectura, pasar directamente al siguiente capítulo.

Todo arranca de la interpretación de la función de onda de Schrödinger que, como postuló Born, al elevarse al cuadrado es proporcional a la probabilidad de encontrar a la partícula, digamos a un electrón. Ahora bien, la ecuación de Schrödinger admite soluciones que en general son números complejos, por lo que ese cuadrado debe entenderse como el valor absoluto de la función de onda y al cuadrado. Esto implica que una función de onda cualquiera y otra que se obtenga multiplicándola por una función cuyo valor absoluto valga uno tienen la misma información física. Tan buena es una como la otra.

A estas funciones de valor absoluto unidad los físicos y matemáticos las llaman fases. Estas fases pueden o no depender del punto del espacio-tiempo. Si no dependen, nada espectacular ocurre. Pero si existe alguna dependencia espacio-temporal de la fase, pueden también ocurrir dos cosas: al recorrer un circuito cerrado en el espacio, la fase puede o no recuperar su valor. Si lo recupera, nada espectacular ocurre, pero si la fase no regresa al valor que tenía antes del recorrido por el circuito y al llegar al mismo punto, Dirac dice que ello significa que el electrón está sujeto a un campo electromagnético.

En este sentido, Dirac encuentra un segundo principio de equivalencia en la física. El primero, postulado por Einstein, nos dice que un sistema de referencia acelerado (como un elevador que cae, por ejemplo) es indistinguible de un campo gravitacional constante. Dirac nos dice que estas fases raras que no regresan a su valor al recorrer un circuito son indistinguibles de un campo electromagnético.

Y continúa Dirac su razonamiento impecable: la fase es una función matemática peculiar, pues al aumentarse por un múltiplo entero del número $\mathbf{2\pi}$ nada pasa. Por ello el cambio en la fase, al recorrer el circuito, o este cambio más $\mathbf{2n\pi}$ siendo n un número entero, da lo mismo. Por su principio de equivalencia, éste es el flujo magnético, o sea, la cantidad de líneas de campo magnético que cruzan cualquier superficie S que bordee al circuito. Cuando este circuito es muy pequeño, el flujo magnético y el cambio en la fase se anulan, por lo que n debe ser igual a cero. Todo está de acuerdo a nuestros prejuicios.

Sin embargo, hay algunos puntos donde ψ es cero. En tal caso, por pequeño que sea el circuito, la fase puede cambiarse bruscamente y ya no se anularía necesariamente. En general, $\psi = \mathbf{0}$ a lo largo de una línea en el espacio, que llamaremos línea nodal. Pueden darse dos situaciones distintas: la línea nodal tiene o no un principio. En el primer caso, surge algo interesante, como ahora veremos.

Supongamos que la superficie S que rodea al circuito se cierra, esto es, que hacemos el circuito pequeñísimo. Ya que una superficie cerrada no tiene perímetro, el cambio en la fase al recorrer ese perímetro se anula. Sólo sobreviven las líneas nodales, donde ψ es igual a cero. Si la línea nodal no tiene principio ni final, nada ocurre, pues esa línea contribuye dos veces al flujo magnético en S: de manera positiva cuando entra a la superficie, de forma negativa cuando sale. Pero si la línea nodal empieza (o termina) dentro de S, ¡un campo magnético se origina ahí adentro! Es como si hubiera una carga

magnética, como si existiera el monopolo. Nada hay en la mecánica cuántica que impida la presencia del monopolo.

Llegamos así, tomados de la mano de Dirac, a la situación siguiente: existen algunas funciones de onda de Schrödinger con una línea nodal que tiene un principio o un final. En estos puntos en que comienza o termina la línea nodal se encuentra un monopolo magnético, que produce unas líneas de campo magnético semejantes a las de la Figura 13a. Si las líneas empiezan en ese punto, por convención llamamos al monopolo "norte", y si ahí acaban le llamamos "sur".

Dirac aplica después las leyes del electromagnetismo —las ecuaciones de Maxwell— al problema de un electrón con carga ***e*** que se mueve frente a un monopolo de intensidad μ. Si μ ha de existir, la mecánica cuántica requiere que

$$\mu = \frac{\hbar c}{2e} n,$$

donde *n* es un entero o, puesto al revés, la carga eléctrica ha de ser un múltiplo entero de la cantidad $\hbar c/2\mu$. Si en algún punto del universo existiera un monopolo magnético, la carga eléctrica sería por fuerza un múltiplo entero de una carga eléctrica fundamental. A esto le llaman los físicos la cuantización de la carga. El monopolo de Dirac es la única explicación razonable que tenemos de este hecho misterioso. De ahí la importancia que sus colegas dieron a esta idea revolucionaria.

XXV. LAS PROPIEDADES DEL MONOPOLO MAGNÉTICO

TENEMOS, pues, que el formalismo de Schrödinger, el principio de equivalencia de Dirac y la electrodinámica llevan por fuerza a la siguiente conclusión: si hay un monopolo magnético de intensidad μ, entonces $2\mu e = n\hbar c$, y la carga eléctrica está cuantizada.

Ya hemos mencionado la relación adimensional $\hbar c/e^2=137$. De aquí, y con el valor más pequeño posible de ***n***, ***n* = 1**, tenemos

$$d = \frac{648\,000\ R_t}{3.1415\ p}$$

para la intensidad mínima del polo magnético. Es decir, el monopolo es cerca de 70 veces más intenso que la carga eléctrica; el monopolo es, por decir lo menos, algo "grandote" comparado con un electrón.

Veamos ahora cómo podría aparecer un monopolo desde el punto de vista experimental. Primero, nos damos cuenta de que el monopolo es estable, pues al igual que la conservación de la carga, las ecuaciones de Maxwell exigen la conservación de la intensidad de los polos magnéticos. La única forma de aniquilar un monopolo, digamos sur, sería haciéndolo chocar contra otro de signo opuesto: el monopolo norte sería la antipartícula del monopolo sur. Por la acción recíproca, se busca crear un par monopolo-antimonopolo con los grandes aceleradores hoy disponibles. Este fenómeno de creación de pares magnéticos no ha sido observado hasta el presente.

Si un monopolo de Dirac existiera, ¿qué trazas dejaría al cruzar la materia? Al pasar, con gran velocidad, a través de un material, se produciría una fuerte ionización de los átomos que encontrara el monopolo en su camino. Es decir, el monopolo sacaría los electrones de la influencia del núcleo atómico, arrancándolos violentamente del átomo. Este proceso de ionización también lo causa una carga eléctrica, pero de manera menos brusca. Veamos la comparación entre ambos procesos.

Una partícula cargada que pase cerca de un átomo podrá jalar alguno de sus electrones y así ionizarlo. La fuerza entre carga y electrones es proporcional a la carga en la partícula, digamos Z*e*; esta fuerza actúa durante un intervalo de tiempo que es inversamente proporcional a la velocidad de la carga: mientras más despacio se mueva, mayor es el "daño" que causa al átomo. A medida que la carga pierde energía, su velocidad decrece y la ionización aumenta. Hacia el final de la traza, ésta se vuelve más gruesa.

Ahora tomemos en lugar de una carga un monopolo de Dirac. El campo *eléctrico* producido por un monopolo al moverse es semejante al campo *magnético* producido por una carga eléctrica, según vimos en la Figura 13. Si el monopolo cruza la materia con velocidad *v*, la fuerza que produce sobre los electrones atómicos sería proporcional a *v*. Para tener el efecto que causa, habrá que multiplicar la fuerza por el intervalo de tiempo que actúa; este último es, como antes, inversamente proporcional a *v*. ¡El efecto es independiente de la velocidad del monopolo! En consecuencia, la traza que deja a su paso no se engruesa al final; así podemos detectar el paso de un monopolo.

Por otro lado, el monopolo tiene una carga μ que es muchísimo mayor que la eléctrica. Por ello μ ioniza con una efectividad 10 000 veces mayor que una carga *e*. Al cruzar las placas con emulsión fotográfica que usan los físicos para detectar partículas, el monopolo dejaría una traza miles de veces más negra que la que deja un electrón que se mueva con la misma velocidad. También, gracias a esta fuerte ionización que induce, m pierde energía más rápidamente que *e* y las trazas son más cortas.

XXVI. LAS CAMPANAS SE ECHAN A VUELO

PODEMOS ya entender en qué se basan algunos experimentos diseñados para buscar el monopolo magnético. Tal como dijimos, Price y sus colaboradores de la Universidad de Berkeley mandaron sus detectores a volar en globo durante varios días. El aparato consistía en una serie de hojas de un cierto material transparente, llamado lexan, apiladas una sobre la otra. El paso de una partícula daña las hojas, con un efecto proporcional a la ionización. Los resultados de Price y sus colegas se ven en la figura 22, donde se observa la traza de una partícula que se mueve hacia abajo en la pila de detectores. Los puntos que marca la partícula yacen aproximadamente en una línea vertical. Esto último no sucedería si la ionización fuera causada por una carga; la línea punteada en la Figura 22 corresponde a una carga muy grande, igual a 96*e*, que se mueve rapidísimo, a tres cuartas partes la velocidad de la luz. Como se ve, los datos observados no se ajustan a la línea punteada, pero la línea vertical —que podría ser producida por un monopolo magnético— sí. Price y sus amigos concluyeron que habían logrado, por fin, atrapar un monopolo y sacudir el mundo de la física.

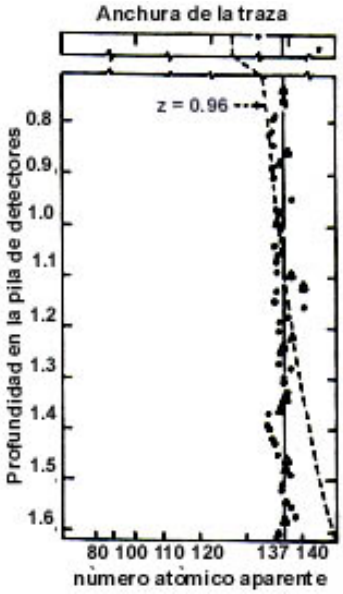

Figura 22. Los puntos experimentales que obtuvieron Price y sus colegas yacen en una vertical; de ahí concluyen haber detectado un monopolo.

Muy pronto la interpretación de Price halló un fuerte rechazo por parte de otros experimentadores que también perseguían, o habían perseguido, al monopolo. Esta reacción de los otros científicos es característica en el mundo de la investigación, siempre lleno de críticos mordaces que defienden su territorio, muchas veces de manera no ortodoxa y con reacciones meramente emocionales. Aunque tal tipo de comportamiento de los científicos no ha sido muy estudiado, a primera vista no difiere mucho del que podemos observar en otros campos de la actividad humana: está muy cerca del comportamiento de un animal cuando defiende su madriguera.

El primero que negó la evidencia de Price fue, como ya dijimos, su propio jefe, Luis Álvarez. En su opinión, las trazas eran causadas, no por un monopolo, sino por una partícula que, luego de atravesar en parte la pila de detectores, chocaba con un núcleo y se desintegraba; como resultado de ello, reducía su carga y continuaba su viaje ionizando menos. De ahí la traza vertical que Price observó. Cálculos posteriores mostraron que ese movimiento vertical sería una mera casualidad, por lo que la idea de Álvarez se desechó.

Más fuertes fueron las críticas sobre el detector mismo. Un experimento de rayos cósmicos del tipo aquí

descrito se caracteriza por el llamado factor área-tiempo: éste es un número igual al producto del área del detector por el tiempo de exposición. El detector de Price tiene un factor área-tiempo al menos un millón de veces menor que el de otros experimentos, que fallan al buscar el monopolo. Si Álvarez no lo vio en las rocas lunares —expuestas a partículas de todas clases, incluidos los monopolos, durante billones de años—, lo que Price y sus colaboradores encontraron, con toda seguridad, no es el monopolo.

Hubo también otros problemas con la interpretación de Price. Se sugirió que, tal vez, un núcleo superpesado habría podido causar la traza anómala, o bien que alguna antipartícula masiva podría ser la responsable. En todo caso, el episodio que relatamos ha llevado al análisis cuidadoso de cómo perdería por ionización su energía un monopolo magnético.

Este problema permanece abierto y el tañido de las campanas echadas a vuelo por los físicos norteamericanos ha dejado de oírse.

XXVII. EL MONOPOLO SUPERPESADO

POR el tiempo en que Price anuncio su "descubrimiento" del monopolo, la idea de la carga magnética surgió de nuevo, ahora en la física de las partículas elementales. En efecto, el físico holandés Gerard t'Hooft, e independientemente de él, el físico soviético Alexander Polyakov encontraron que una cierta clase de teorías, llamadas de norma, que se emplean para explicar las propiedades de las partículas elementales, no sólo permiten sino que implican forzosamente la existencia del monopolo magnético. Según estos físicos, este monopolo ha de ser muy masivo, más pesado que cualquier partícula elemental vista hasta el presente; además, no es puntual, aunque sí muy pequeño en extensión.

La situación, en breves palabras, es la siguiente: Antes del descubrimiento del neutrón en 1932 por Chadwick, los físicos conocían dos tipos de fuerzas entre partículas fundamentales: la electromagnética y la gravitacional. Para explicar la estructura del núcleo, se postuló la existencia de la fuerza nuclear o interacción fuerte. Esta es la fuerza con que los constituyentes del núcleo —protones y neutrones— se atraen para formarlo. La fuerza nuclear es mucho más intensa que las otras dos conocidas hasta entonces, y de ahí que el núcleo sea mucho menor que el átomo, como se explica en la Figura 23. Una cuarta fuerza hizo luego su aparición, la interacción llamada débil, que causa la desintegración β del núcleo. Pues bien, a cada tipo de fuerzas se le diseñó una teoría a la medida: la electrodinámica cuántica para las interacciones eléctricas y magnéticas, la relatividad general para las fuerzas gravitacionales y así sucesivamente para las otras dos. El sueño dorado de muchos físicos —Einstein, entre ellos, luchó hasta el final de su vida por una teoría unificada del electromagnetismo y la gravitación—, es construir la "gran teoría unificada", que englobe a todas las interacciones. Este sueño se ha realizado parcialmente: la teoría electrodébil consiguió unificar a la fuerza electromagnética y a la interacción nuclear débil en un solo marco teórico, que trata a ambas fuerzas como diferentes manifestaciones de la misma interacción subyacente. El esfuerzo ahora se concentra en la "gran unificación", que busca englobar también a la interacción nuclear fuerte. Con ello, sólo quedaría fuera la gravitación.

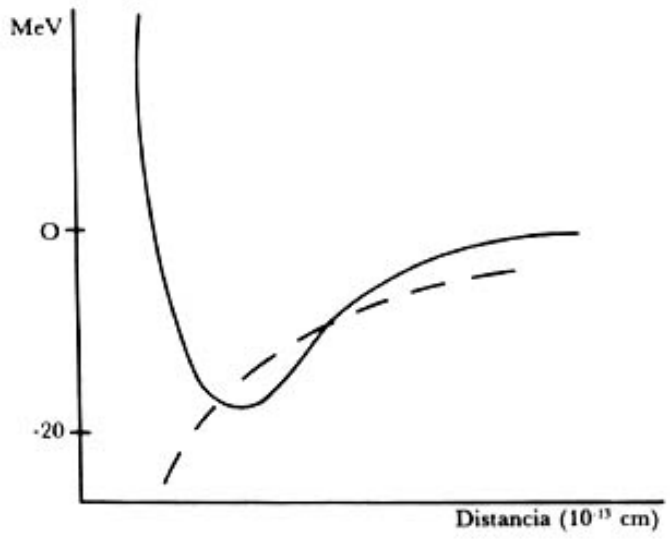

Figura 23. Para que el potencial eléctrico entre dos cargas (línea punteada) sea del mismo orden que el potencial nuclear (línea sólida), la carga de las partículas debería ser 3.3 veces la del electrón: el núcleo es menor que el átomo.

Según los conceptos en boga, los protones y otras partículas que interactúan fuertemente están formados por cuarks. En la gran teoría unificada, estos cuarks pueden cambiarse en leptones, que son partículas como el electrón que responden a la interacción débil, mas no a la fuente, cuando chocan con un leptocuark, que es una partícula extremadamente masiva, digamos 100 billones de veces más pesada que el

protón. Según t'Hooft y Polyakov, siempre que haya un leptocuark habrá un monopolo magnético, también superpesado. La gran teoría unificada predice que el protón es inestable; si esto se observa, tal vez veamos también el monopolo.

En este punto la física de las partículas muy pequeñas y veloces hace contacto con la física de lo muy grande, con el Universo en su conjunto, y sus galaxias. Sólo en la gran explosión primigenia con que nació el Universo pudo haber hornos con temperaturas suficientemente grandes para generar partículas tan pesadas como el monopolo. En esa cocina cósmica se habrían producido tantos polos sur como norte, algunos se habrían recombinado y muchos habrían sobrevivido. No hay razón alguna para pensar que estos últimos no deambulen hoy por algún rincón del Universo.

Esta nueva visión del monopolo y sus consecuencias cosmológicas desde luego renovó el interés por buscar la elusiva carga magnética. Un buen número de especulaciones, de brillantes ideas teóricas y de fantásticos experimentos surgieron en cascada. Veamos algunos de ellos.

XXVIII. LA COSMOLOGÍA Y EL MONOPOLO

SI se piensa en esos monopolos, tan pesados como un ser vivo microscópico, viajando por una galaxia, podemos imaginar varios efectos interesantes. La galaxia produce un campo magnético débil, cien mil veces menor que el campo magnético terrestre, el cual se debe a la circulación en grande de partículas eléctricamente cargadas. En ese campo magnético, por muy débil que sea, un monopolo sería acelerado hasta energías muy altas, aunque a velocidades relativamente pequeñas, tal vez iguales a un milésimo de la velocidad de la luz; esto último se debe a que el monopolo es mucho muy pesado, tanto como $\mathbf{10^{16}}$ protones, casi el tamaño de una de esas amibas que nos causan infecciones intestinales. La gran energía que adquiere el monopolo, debe salir de algún lado; la chupa del campo magnético de la galaxia, que así iría decreciendo hasta desaparecer. Si hubiera muchos monopolos, el campo magnético de la galaxia habría ya desaparecido. Pero el caso es, como bien lo saben los astrónomos, que este campo existe. Así obtenemos una cota superior para el número de monopolos que hay en la galaxia en un momento dado.

Otra idea sobre la población de monopolos en el Universo está relacionada con la masa invisible que hay en él. Los cosmólogos se preguntan si el Universo continuaría expandiéndose, como hoy lo hace, o bien si la expansión se detendría para después colapsarse. La respuesta a esta crucial pregunta sobre el destino del Universo está íntimamente ligada a cuánta masa contiene. La masa que vemos, al ser la de objetos que radian luz, como por ejemplo una estrella, no basta para detener la expansión del Universo. Por ello se plantea la cuestión de la materia faltante.

Uno de los candidatos para llenar ese hueco y proveer la materia invisible faltante es el neutrino. (La historia del neutrino se remonta a los veintes, cuando se descubrió que el núcleo emitía partículas beta —que no son otras que electrones veloces— en aparente contradicción con la conservación de la energía. En 1931 Pauli sugirió que en esta desintegración, causada por la interacción débil, además del electrón se emitía otra partícula, sin carga y muy ligera, acaso de masa cero. El gran físico romano Enrico Fermi la bautizó con el diminutivo italiano de neutrón: así entra en la física el neutrino. Sin carga y muy ligero, el neutrino es difícil de detectar; la prueba experimental directa de que existe sobrevino 25 años después del trabajo de Pauli, cuando se le encontró mediante un complicado experimento en una planta nuclear.) Pues bien, si los neutrinos tienen algo de masa, por pequeña que ésta sea, pueden contribuir de manera significativa a la masa del Universo, porque lo llenan con una densidad grande, del orden de un millón de neutrinos por centímetro cúbico.

Otro candidato para llenar el faltante de masa es el monopolo magnético, pues radia muy poco y sería invisible. Sin embargo, como el monopolo es tan pesado, no podría haber muchos de ellos. Se estima que menos de uno por cada $\mathbf{10^{15}}$ protones. Aquí surge un dilema, pues la gran teoría unificada y las ideas cosmológicas usuales predicen que, más bien, debería haber un monopolo por cada protón. La salida al dilema estará, quizás, en que se ha subestimado el proceso de aniquilación monopolo-antimonopolo y que por eso la densidad de cargas magnéticas es hoy mucho menor.

En todo caso, las nuevas teorías unificadas y su repercusión cosmológica han generado un nuevo interés en el monopolo, y nuevos experimentos se han llevado a cabo.

XXIX. LOS NUEVOS EXPERIMENTOS

AJUSTANDO las teorías de partículas elementales o las teorías cosmológicas, se llegó al siguiente límite para la población del monopolo: debe haber al menos uno por cada $\mathbf{10^{20}}$ protones. Con esta densidad, deberían llegar a cada kilómetro cuadrado de la superficie terrestre unos cuantos monopolos (200 sería una cota máxima) cada año. Aunque este flujo de monopolos es pequeño, experimentadores armados de gran paciencia y de finos aparatos de detección podrían encontrar un monopolo. Descubrirlo sería tan importante como lo fue en su tiempo el hallazgo del positrón, la otra interesantísima predicción del gran Dirac.

Se disponen, pues, los físicos experimentales a inventar detectores para esas partículas, lentas y pesadas, que acarrean una carga magnética. Desgraciadamente, no se sabe con exactitud cómo afectaría a la materia, al atravesarla, ese monopolo superpesado. No estamos seguros de que ionizará fuertemente, a diferencia de lo que haría el viejo monopolo de Dirac. De lo que sí estamos ciertos es que el detector deberá ser enorme. Varios intentos en esta dirección, basados siempre en el poder ionizante del monopolo, han fallado hasta ahora porque los detectores no son suficientemente sensibles. Se requieren aparatos que lo sean al menos 10 000 veces más que los actuales.

Por ello se ha buscado un camino diferente, que no se base en la ionización, sino en otras propiedades del monopolo. Por ejemplo, al perturbar la materia, la carga magnética produciría pulsos acústicos, que podrían detectarse. Sin embargo, para registrar esta señal y distinguirla del ruido térmico de fondo, se requiere enfriar el detector para que su temperatura sea apenas unos milésimos de grado arriba del cero absoluto. Ya que el detector debe ser grande para pescar monopolos, el problema técnico para construirlo es enorme, imposible de resolver por medio de la tecnología actual. Un método diferente se basa en la interacción del monopolo magnético y un anillo superconductor, como en el experimento de Cabrera.

XXX. LA SUPERCONDUCTIVIDAD Y LOS MONOPOLOS

ANTES de describir con detalle las ideas que sustentan el experimento que Blas Cabrera llevó a cabo, es conveniente hacer un paréntesis para presentar qué son los superconductores. Al hablar del campo magnético, hicimos un modelo para un alambre conductor, cuyo esquema presentamos en la Figura 8. En ese modelo del sólido conductor los electrones con carga negativa se movían al ser impulsados por un campo eléctrico externo, mientras que los iones permanecían quietos, a lo más oscilando respecto a su posición de equilibrio. La realidad es un poco más compleja, y sólo la mecánica cuántica nos puede explicar la diferencia entre un sólido que conduce electricidad y otro que es aislante. Es más, con la ayuda de la nueva física se han podido producir materiales cuya resistividad eléctrica se puede controlar. Estos materiales —los semiconductores— forman el corazón de los transistores, de los microcircuitos y de otros elementos básicos de la electrónica moderna, tecnología sin la cual es difícil imaginar a la sociedad actual.

En el párrafo anterior, el papel central lo juegan los electrones, sin que aparentemente intervengan, salvo en forma incidental, los iones. Del tipo de átomos que formen el sólido surge la estructura cristalina y la posibilidad de que los electrones se puedan mover más o menos libremente, lo que determina si el material es buen conductor o no. Sin embargo, hay un mecanismo en que intervienen tanto iones como electrones, mediante el cual un sólido se puede convertir en un superconductor.

Puesto que los iones se mueven oscilando, pensemos en un modelo para las vibraciones de la red cristalina que forman. El modelo es el siguiente: cada átomo se acopla a sus vecinos más cercanos por medio de algún tipo de resorte. Entre los posibles movimientos de los átomos así amarrados por resortes, existen unos, llamados modos normales, en que todas las partículas oscilan con la misma frecuencia. Al igual que en las oscilaciones electromagnéticas existen los cuantos de luz —los fotones que Einstein introdujo a la física—, a estos modos normales corresponden otros cuantos, que se llaman fonones. Estos fonones se parecen mucho a partículas microscópicas reales: tienen una velocidad y energía bien definidas. Por otro lado, no pueden existir sin la malla de átomos, es decir, fuera del cristal. Además, aumentando la energía de vibración del sólido, los átomos oscilan más, es decir, se crean más fonones. Si, por otro lado, enfriamos el cristal logramos que haya menos fonones. En consecuencia, los fonones se pueden crear y destruir.

Los fonones son los responsables directos de muchos fenómenos en los sólidos. En particular, causan la resistencia eléctrica, pues interfieren con los electrones. Al bajar la temperatura, los átomos se aquietan y desaparecen los fonones. Ya muy cerca del cero absoluto, puede darse que un electrón jale a los iones vecinos a él, por mera atracción eléctrica, y que estos iones a su vez atraigan a otro electrón que deambule por ahí. Este efecto, que ilustramos en la Figura 24, puede lograr que los dos electrones se unan para viajar juntos por el cristal, moviéndose sin dificultad. Hemos así encontrado un material de bajísima resistencia, de muy alta conductividad: ¡estaremos frente a un superconductor!

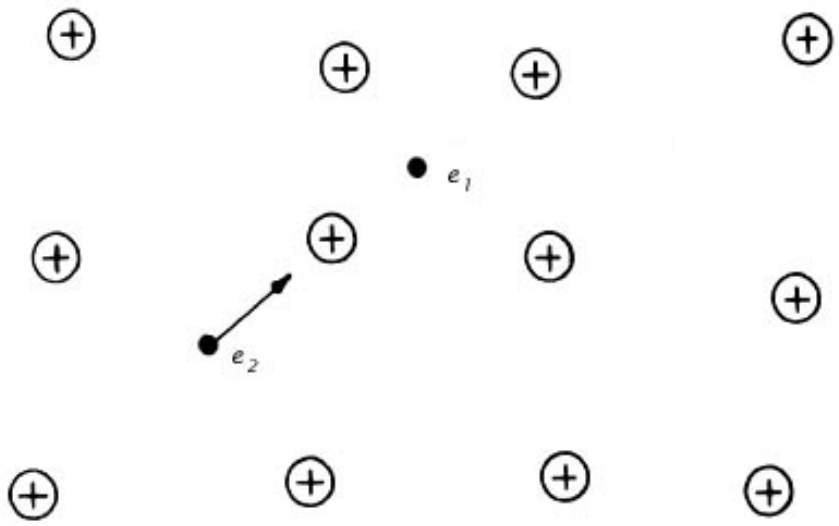

Figura 24. Un electrón e1 atrae a los iones positivos vecinos, y éstos a su vez al otro electrón e2 que deambula por ahí.

Esta explicación de la superconductividad se dio apenas hace veinticinco años. El fenómeno superconductor a bajas temperaturas, sin embargo, es conocido desde principios de siglo, cuando el físico holandés Kammerlingh Onnes pudo licuar helio y obtener temperaturas tan bajas como 0.8 kelvin sobre el cero absoluto. Con estas bajas temperaturas, Onnes descubrió la superconductividad.

El estado superconductor es muy diferente al estado normal de los sólidos. Como ya dijimos, un superconductor presenta una resistencia eléctrica muy baja; además, no permite que un campo magnético penetre en su interior; en fin, representa toda una fase diferente, que es una manifestación macroscópica de efectos cuánticos. Uno de estos efectos, conocido como la cuantización del flujo, es el siguiente: si una supercorriente fluye en un anillo superconductor, el campo magnético que produce a su alrededor debe ser tal que su flujo a través del anillo (es decir, el número de líneas de campo magnético que cruzan una superficie bordeada por el anillo, como se ve en la Figura 25) debe ser un múltiplo entero de la cantidad $\hbar c/2e$.

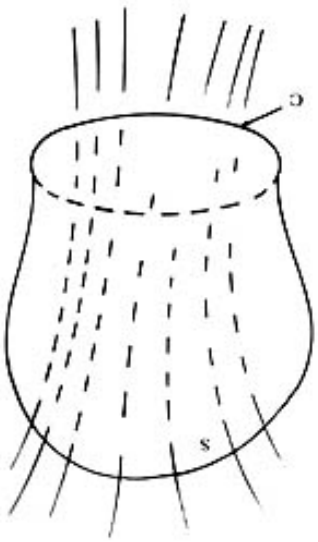

Figura 25. El flujo magnético es el número de líneas de campo que cruzan cualquier superficie —como la S de la figura que bordea el anillo *C*.

Si comparamos este valor del flujo magnético cuantizado con el valor predicho por Dirac para la carga magnética, $\mu = \hbar c/4\pi e$, nos damos cuenta de inmediato que los anillos superconductores constituyen antenas naturales para detectar el monopolo. Cuando una carga magnética cruzara por el anillo el flujo magnético se alteraría, con lo cual tendríamos una traza inequívoca de la presencia del monopolo. Cabrera

calcula la corriente inducida como función de la distancia al centro del anillo superconductor, cuando un monopolo se acerca a lo largo del eje del alambre. El resultado se ve en la Figura 26, donde vemos que al paso del monopolo la corriente sufre un brinco y luego permanece constante.

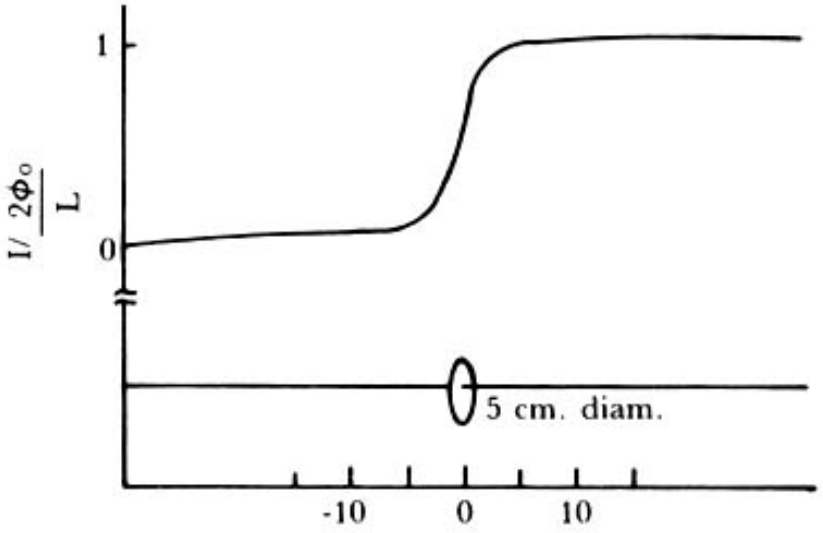

Figura 26. La corriente en el anillo superconductor cuando un monopolo lo cruza.

Con lo hasta aquí dicho, hemos completado finalmente la exposición de los conceptos físicos que se hallan detrás de un experimento como el de Cabrera. Y podemos, por fin, apreciar lo que significa hacer física y gozar la descripción de lo que es un experimento bien hecho.

XXXI. UN EXPERIMENTO CUIDADOSO

EN el volumen 48 del número correspondiente al 17 de mayo de 1982 del *Physical Review Letters* —revista norteamericana donde se presentan los más nuevos descubrimientos en física y en la cual ansían publicar todos los físicos que trabajan en Estados Unidos—, Blas Cabrera informa sobre los primeros resultados de un detector superconductor para monopolos magnéticos en movimiento. Dado lo acucioso y bien planeado que es este experimento, vale la pena describirlo con detalle. Así aprendemos cómo se hace bien el trabajo experimental en física.

Como ya dijimos, se trata de medir el cambio en el flujo magnético en un anillo superconductor. En el experimento se construyó una pequeña bobina de cuatro vueltas, con un diámetro de cinco centímetros y se le colocó de tal manera que su eje estuviera vertical. La bobina se conectó a un precioso aparato llamado SQUID por sus siglas en inglés: *Superconducting quantum interference device*, construido por una compañía de alta tecnología de San Diego, California. El paso de un monopolo de Dirac alteraría ocho veces el flujo magnético fundamental $\hbar c/2e$. Un factor 4 viene del número de vueltas en la bobina y un factor 2 del hecho que el monopolo **4**μ es igual a 2 $(hc/2e)$. Tanto la bobina como parte del SQUID se colocaron dentro de un cilindro de un metro de largo y 20 cm de diámetro. Este cilindro se hacía también superconductor para blindar a la pequeña bobina del campo magnético exterior. Todavía más: todo el sistema se metía dentro de otro cilindro, fabricado con un material llamado metal μ, lo que mejora el blindaje. Como se ve, el experimento requiere de muchos cuidados.

Luego se calibró el detector y se midió su sensitividad con tres métodos diferentes. Los tres procedimientos dieron el mismo resultado. Se estimó también lo que ocurriría si el monopolo golpeara al SQUID o cruzara por el cilindro superconductor. Se dejó, finalmente, correr el experimento, registrando flujos como los que se ven en la Figura 27 durante 151 días. En la figura son evidentes los disturbios causados por el cambio de nitrógeno líquido, cada día, o por el recambio semanal del helio líquido. Finalmente, el 14 de febrero de 1982, hubo un cambio brusco en el flujo, el detector respondió con un flujo exactamente igual a **8** $(\hbar c/2e)$, como si hubiera pasado por ahí un monopolo de Dirac. La famosa gráfica de Cabrera se ha mostrado ya, en la Figura 2. Con una pequeña incertidumbre, Blas Cabrera dice cautelosamente: este evento, el más grande que se ha registrado, es consistente con el paso de una carga de Dirac.

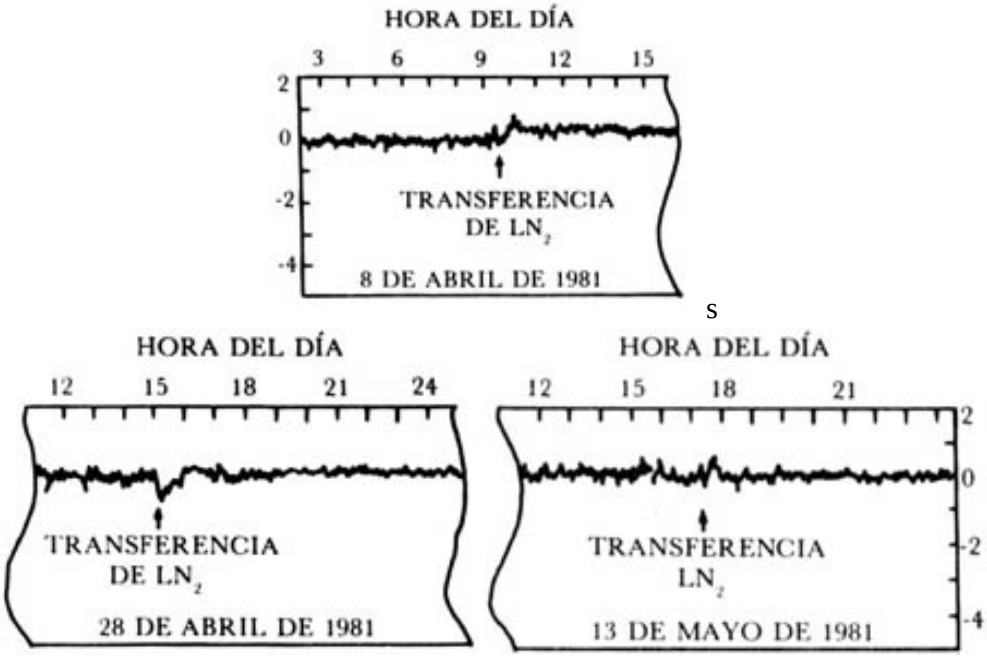

Figura 27. Grabaciones del flujo magnético en el experimento de Cabrera, obtenidas en tres días diferentes. Se observan las fluctuaciones al tiempo del recambio de los líquidos refrigerantes, como el nitrógeno o el helio líquidos.

Cuando se encuentra algo tan impresionante como lo hallado por Cabrera y tan buscado por muchos otros físicos del mundo, más vale ser cauteloso e imaginar todas las posibles fuentes de error. He aquí las que se le han ocurrido al nieto de don Blas:

1) Las fluctuaciones en el voltaje de la línea, que se produjeron adrede al cortar la alimentación eléctrica y crear los correspondientes transistorios, no produjeron respuesta del detector.

2) La interferencia por radiofrecuencia, causada por las escobillas de un motor de un reactor de pelo, no produjo tampoco señal alguna, aun cuando operara en la vecindad del aparato.

3) Los cambios en campos magnéticos externos se atenúan exponencialmente; la contaminación ferromagnética se hace mínima, al haber usado técnicas de montaje extremadamente limpias; esa baja contaminación fue comprobada con las medidas de un magnetómetro, hechas dentro del blindaje.

4) La corriente crítica en la bobina, que destruiría sus propiedades superconductoras, es $\mathbf{l0^8}$ veces mayor que la producida por el supuesto paso del monopolo.

5) Se generaron golpes mecánicos al aparato, golpeándolo con el mango de un desarmador. En dos de veinticinco ocasiones, el flujo llegó a ser tres cuartas partes de lo esperado con la carga de Dirac; sin embargo, hubo inestabilidades durante la hora siguiente al golpe.

6) No hubo sismo alguno el 14 de febrero de 1982.

7) Un rayo cósmico muy energético que cruzara el alambre subiría la temperatura localmente por menos de un centésimo de Kelvin. Este cambio no basta para destruir la superconductividad, pues para ello se requiere un cambio de 5 Kelvin.

Luego de todo lo anterior, ahí queda el solo evento observado por Cabrera, que quizá haya sido el paso del monopolo magnético de Dirac.

EPÍLOGO

ANTES de 1980, los experimentos que buscaban al monopolo magnético hubieran tenido éxito si alguna de las siguientes tres condiciones fuera cierta: la masa del monopolo no es tan grande como para que parejas de monopolos-antimonopolos pudieran formarse en el choque de las partículas que se producen en los grandes aceleradores; los monopolos se capturan eficientemente por la materia común y corriente y quedan en ella confinados por fuerzas magnéticas, de tal forma que un campo magnético externo muy fuerte los podría arrancar; los monopolos se mueven muy rápidamente, de tal manera que ionizan a su paso fuertemente la materia.

Ninguna de estas tres condiciones, desgraciadamente, es válida para el monopolo magnético predicho en la Gran Teoría Unificada, cuya más prominente predicción es que el protón no es estable, que puede decaer con una vida media grandísima. Por ello ahora se buscan monopolos en detectores subterráneos gigantescos, como los que se han construido para detectar los neutrinos cósmicos o el decaimiento del protón. Estos experimentos imponen cotas superiores al número de monopolos presentes en los rayos cósmicos. Estas cotas son todavía muy altas y no satisfacen a los astrónomos, pues habría hecho desaparecer ya el campo magnético de las galaxias.

De todas formas, la presencia del monopolo sería manifiesta de la manera más clara en experimentos como el de Cabrera: el cambio en el flujo magnético que se produciría cuando un monopolo cruzara un anillo superconductor. Este efecto no depende de la masa ni de la velocidad del monopolo, que siguen siendo una incógnita. Si el experimento es, como el de Blas Cabrera, suficientemente cuidadoso, se podría detectar el monopolo. No obstante, otros experimentos, realizados con el mismo aparato que ya describimos y con otro cuya eficiencia es mayor, no han logrado detectar otro evento como el del 14 de febrero de 1982. Aunque no se han hallado, todavía, deficiencias claras y específicas en el experimento de Stanford, un solo evento no basta para convencer a los físicos de que el monopolo magnético existe.

Sin embargo, los físicos siguen buscando... En un experimento reciente, cuyos resultados fueron publicados en la revista inglesa *Journal of Physics* en octubre de 1985, el físico soviético V. F. Mikhailov observó algunos efectos interesantes que bien podrían delatar al monopolo magnético. Mikhailov preparó un aerosol de pequeñísimas partículas ferromagnéticas, cuyo radio es apenas de 100 Angstroms, y las expuso a un rayo láser muy potente. Luego las sujetó al campo magnético producido por un alambre donde circula una corriente eléctrica y observó cómo se mueven los minúsculos ferromagnetos. La gran mayoría de las partículas del aerosol cumplen lo esperado: son insensibles al campo magnético producido por la corriente eléctrica del alambre y ejecutan tan sólo un movimiento browniano, como corresponde a partículas tan pequeñas. Empero, Mikhailov observó doce trazas peculiares inmersas en el mar de trayectorias brownianas. Esas trazas particulares sólo pueden explicarse si se supone que las correspondientes doce partículas llevan a cuestas un monopolo. Una vez más, la evidencia experimental es magra y quizás, como en ocasiones anteriores, el descubrimiento de la carga magnética resulte sólo un espejismo. La gran ilusión, no obstante, sigue en pie.

COLOFÓN

Este libro se terminó de imprimir y encuadernar en el mes de octubre de 1997 en los talleres de Impresora y Encuadernadora Progreso, S. A. (IEPSA), calzada de San Lorenzo 244, 09830 México, D.F.

Se tiraron 3000 ejemplares.

La Ciencia para Todos es una colección coordinada editorialmente

por *Marco Antonio Pulido*

y María del Carmen Farías.

Índice | Anterior | Previo

CONTRAPORTADA

Un imán —nos refiere Jorge Flores Valdés— tiene dos polos, unos de los cuales es llamado negativo y el otro positivo. Si se rompe un imán a la mitad, se obtienen idos imanes! Cada una de sus partes desarrolla sus polos negativo y positivo. Hasta ahora, los físicos no han sido capaces de producir un imán que tenga un polo único. Sin embargo, los científicos insisten en su búsqueda, incluso algunos han pensado, en determinado momento, que han logrado encontrarlo. Uno de ellos el científico Blas Cabrera, quien es posible que el 14 de febrero de 1982 haya visto por vez primera un monopolo magnético cuando hizo pasar una carga magnética a través de un anillo superconductor, lo que produjo un salto en la corriente que circulaba por el anillo. La gráfica de este experimento podría hacerse famosa si se confirma el resultado anunciado por Cabrera.

En la historia de la ciencia hallamos ejemplos de objetos elusivos que parecen complacerse en no dejarse descubrir pese a haber sido predecida su existencia por la teoría. Einstein lanzó en 1916 la idea de que la luz debía desviarse al pasar cerca de un objeto cuya masa fuera enorme y, sólo tres años después, su predicción fue confirmada en estudios hechos durante un eclipse de Sol; sin embargo desde que Paul propuso la existencia de una partícula subatómica, el neutrino, en 1931, hasta su descubrimiento, pasó un cuarto de siglo.

Se cumple de esta manera lo que el autor denomina "la gran ilusión", el lapso que media entre la formulación de una teoría y su comprobación.

En el presente volumen, Flores Valdés aprovecha la narración de la búsqueda del monopolo magnético para introducir al lector en el mundo que se antoja fantástico de la física de partículas moderna, que parece lindar ya con los terrenos de la ciencia-ficción.

Jorge Flores Valdés obtuvo el doctorado en física en la UNAM en 1965. Fue investigador asociado en la Universidad de Princeton. Es investigador del IFUNAM, del cual fue director de 1974 a 1982, fue subsecretario de Educación Superior e Investigación Científica de la SEP. Desde 1988 es director de Universum, el Museo de las Ciencias de la UNAM. Ha recibido en 1972 el Premio de Investigación de la Academia Mexicana de Ciencias, el Premio Universidad Nacional en 1988 y el Premio Nacional de Ciencias en Investigación en Ciencias Exactas y Naturales en 1994. La UNESCO le otorgó en 1992 el Premio Kalinga de Popularización de la Ciencia. Es autor de 130 artículos y 11 libros.