

LA GRAN ILUSIÓN I. EL MONOPOLO MAGNÉTICO

Autor: JORGE FLORES VALDÉS



<http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/menu.htm>



**Compilación y armado: Sergio Pellizza
dto. Apoyatura Académica I.S.E.S.**

- 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
- 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

EDICIONES

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

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 monopolio 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 monopolio 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 monopolio 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 —nietao 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 monopolio 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 monopolio 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 monopolio 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 monopolio 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 monopolos 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 monopolos en la Luna, realizada por Luis Álvarez, premio Nobel de Física e investigador de la Universidad de Berkeley, resultó también infructuosa.

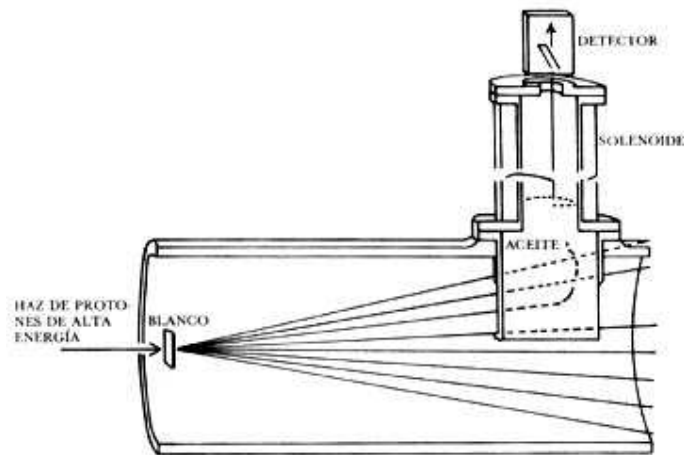


Figura 3. El experimento realizado en Brookhaven en 1962 intentaba crear monopolos por el choque de protones muy energéticos contra hojas muy delgadas de aluminio. El monopolos se detendría en el aceite y luego sería acelerado por un campo magnético hacia el detector. No se detectó ningún monopolos en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

IV. EL GRAN PAUL ADRIEN MAURICE DIRAC

¿POR QUÉ? Cabrera y otros muchos físicos antes que él han buscado afanosamente el monopolio 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 monopolio magnético.¹

Cuando Dirac publicó en los *Proceedings of the Royal Society* su artículo titulado "Singularidades cuánticas en el campo electromagnético", en el que sugiere que el monopolio 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.

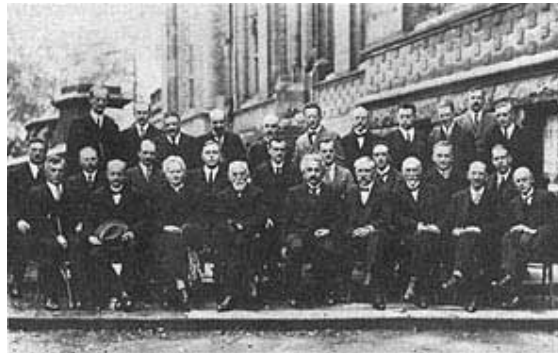


Figura 4. Los creadores de la nueva física reunidos en el congreso

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 monopol 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.

V. DIRAC Y EL MONOPOLO MAGNÉTICO

No HA de extrañarnos, pues, que una sugerencia teórica del famoso y distraído¹ 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 monopol. En el electromagnetismo clásico el monopol 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 monopol magnético, le resta a las hermosas ecuaciones de Maxwell un poco de belleza.

El monopolio 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 monopolio, 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 monopolio magnético ha sido frustrante. Salvo dudosas excepciones, los experimentadores no han hallado signos del monopolio. Por su parte, los teóricos no han podido fincar una

buena razón por la cual el monopolio no debiera existir. Por ello se le sigue buscando: en ausencia de una ley que prohíba 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 monopolio 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 monopolio, 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!

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 monopolio 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 monopolio, 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 descansa 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 monopolio magnético existe:

Un artículo reciente¹ 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 de 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 producir las 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 monopolio 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 por³

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

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 1930 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: $\hbar = h/2\pi = 1.05443 \times 10^{-27}$ ergs, la llamada constante de Planck; $c = 2.997930 \times 10^{10}$ cm/s, la velocidad de la luz, y $e = 4.80286 \times$

10^{10} statc, la carga eléctrica del electrón. La presencia de \hbar 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 cuántico-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.

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 monopolio 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.

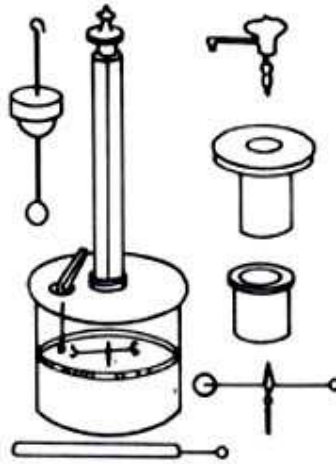


Figura 6. La balanza de torsión que usó Coulomb.

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.

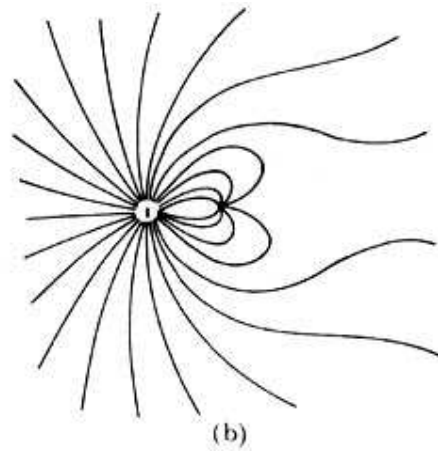
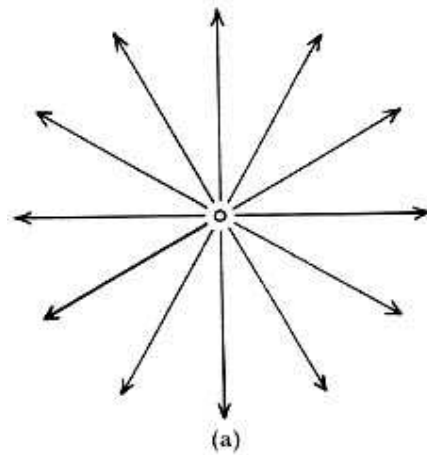


Figura 7. Líneas de campo eléctrico para (a) una carga positiva y (b) dos cargas, una de ellas igual a +1 y la otra igual a -2.

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.