LA GRAN ILUSIÓN II. LOS CUARKS

Autor: JORGE FLORES VALDÉS

- COMITÉ DE SELECCIÓN
- EDICIONES
- DEDICATORIA
- PREFACIO
- NOTA INTRODUCTORIA

- I. EL EXPERIMENTO DE McCUSKER
- II. UN VISTAZO AL ATOMISMO QUÍMICO
- II. LOS ÁTOMOS QUÍMICOS DEJAN DE SERLO
- IV. LAS CATÁSTROFES ULTRAVIOLETA Y ATÓMICA
- V. TEORÍA CUÁNTICA DE LOS ÁTOMOS COMPLEJOS
- VI. EL NÚCLEO Y SU ESTRUCTURA
- VII. LA FÍSICA CUÁNTICA Y RELATIVISTA
- VIII. LOS MENSAJEROS DE LA INTERACCIÓN
- IX. FERMI Y LAS PARTÍCULAS NEUTRAS
- X. LOS MESONES DE YUKAWA
- XI. RAYOS CÓSMICOS EN CASA
- XII. LEPTONES PESADOS
- XIII. LA HISTORIA SE REPITE
- XIV. ¡POR FIN, LOS CUARKS!
- XV. EL MODELO DE CUARKS EVOLUCIONA
- XVI. EL ENCANTO DE LOS CUARKS
- XVII. LAS TEORÍAS UNIFICADAS
- XVIII. LOS CAMPOS DE NORMA

- XIX. PANTALLAS Y CAMUFLAJES
- XX. LA GRAN UNIFICACIÓN
- EPÍLOGO
- HISTORIA GRÁFICA DE LOS ACELERADORES DE PARTÍCULAS.
- COLOFÓN
- CONTRAPORTADA

COMITÉ DE SELECCIÓN

Dr. Antonio Alonso

Dr. Juan Ramón de la Fuente

Dr. Jorge Flores

Dr. Leopoldo García-Colín

Dr. Tomás Garza

Dr. Gonzalo Halffter

Dr. Guillermo Haro †

Dr. Jaime Martuscelli

Dr. Héctor Nava Jaimes

Dr. Manuel Peimbert

Dr. Juan José Rivaud

Dr. Emilio Rosenblueth †

Dr. José Sarukhán

Dr. Guillermo Soberón

Coordinadora Fundadora:

Física Alejandra Jaidar †

Coordinadora:

María del Carmen Farías

Indice

la

ciencia/22

desde méxico

Primera edición, 1987

Segunda reimpresión, 1995

La ciencia desde México es proyecto y propiedad del Fondo de Cultura Económica, al que pertenecen también sus derechos. Se publica con los auspicios de la Subsecretaría de Educación Superior e Investigación Científica de la SEP y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

D. R. © 1987, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA, S. A. DE C. V.

D. R. © 1995, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

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

ISBN 968-16-2537-4

Impreso en México

Indice

DEDICATORIA

A Jacqueline

Indice

PREFACIO

En la historia reciente de la física, y con toda seguridad en muchas otras ramas y tiempos 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. Si estos hechos se descubrieran experimentalmente, la teoría, ya comprobada en otras situaciones, recibiría una confirmación más y conquistaría otra 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 de la teoría general 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 en un eclipse de Sol, mediaron tan solo tres años; y el positrón, antipartícula del electrón predicho por Dirac en 1930, fue descubierto por Anderson en 1932, solamente dos años después. Sin embargo el neutrino, casi sin masa, que según Pauli debería acompañar a la desintegración beta para salvar así un postulado tan fundamental como el de que la energía se conservara, resultó más elusivo; entre 1931, cuando Pauli lo propuso, y su descubrimiento por Reines pasaron cerca de 25 años. No obstante, la gran ilusión se convirtió en realidad en estas tres historias.

Esa gran ilusión no se ha tornado realidad en otros casos, predicciones que también han estado 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 logre.

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 lanzaron a demostrar que el hallazgo había sido en falso; y el epílogo: todo se debía a una falla experimental, que si a una mala calibración del aparato, que si a una confusión en los materiales observados, que si nuestro aparato es más sensible...

Hemos ya relatado en un trabajo anterior (*El Monopolo Magnético*, Colección La Ciencia desde México, Fondo de Cultura Económica, México, 1986) la historia, plena de ideas brillantes y experimentos precisos, del elusivo polo magnético. En lo que sigue narraremos la historia de otra gran ilusión de la física actual, el cuark, que bien podría ser el sucesor de los átomos imaginados por Demócrito hace veinticinco siglos. En dos trabajos posteriores nos ocuparemos de las ondas gravitacionales y de los núcleos superpesados. Todo ello nos da ocasión de contar la fantástica historia de la física moderna, con sus avatares, sus logros y algunas de sus grandes ilusiones.

Quisiera agradecer los útiles comentarios de Tomás Brody, Jorge Flores Espinosa, Matías Moreno, Verónica Riquer y Jesús Robles Domínguez, quienes ayudaron a mejorar mi versión original.

NOTA INTRODUCTORIA

LA BÚSQUEDA del absoluto ha fascinado siempre al hombre. Lo muy grande y lo muy pequeño han incubado en la humanidad, desde el tiempo más remoto, fantasías y misterios. Hasta donde sabemos, fueron los griegos —Demócrito y Epicuro entre ellos— los primeros que intentaron establecer una teoría de las cosas muy pequeñas. La imagen que Demócrito tenía, presenta nociones cuya semejanza con la concepción moderna de la naturaleza es en verdad sorprendente.

El filósofo griego de Tracia, allá por el siglo V antes de Cristo, estableció el primer absoluto del mundo microscópico. Concebía a la materia formada por pequeñas, pequeñísimas partículas que no podrían dividirse. De ahí surge el átomo (del griego, indivisible) que era eterno, incambiable, indestructible; fuera de él, sólo habría el vacío. Existen átomos de diversa naturaleza, como los que forman el agua y que son redondos y lisos, o los que constituyen el fuego, o los que están dentro de la tierra y que son rugosos. Con ello se explica que esas sustancias, resultado de la unión de muchos átomos, tengan tan diferentes propiedades. El movimiento y la manera de comportarse de esos átomos, de acuerdo con Demócrito, está controlado por leyes de la naturaleza que no pueden infringirse. Con tal movimiento no interfieren ni dioses ni demonios —ellos mismos hechos de átomos— y aun el mismo origen del Universo se debe a que un gran número de átomos terminan su movimiento, formando mundos.

Todo el discurso anterior evoca las teorías modernas de la estructura de la materia y del origen del Universo. Sin embargo, entre Demócrito y la ciencia moderna hay el abismo de la experimentación y del razonamiento matemático. En la ciencia actual no sólo cuentan la introspección y la intuición, sino que las conclusiones han de ser verificadas experimentalmente de manera cuantitativa. El experimento es el juez, que decide entre una teoría y otra. Así, las teorías dejan de ser subjetivas.

El relato que sigue es una historia de aventuras, el relato de la búsqueda reciente del verdadero átomo, aquel realmente indivisible: el cuark. En el Prólogo en el Cielo, del *Fausto*, Goethe hace que Mefistófeles se burle del hombre y de sus actos: "no hay fruslería donde no meta su nariz". Esta fruslería es el cuark, de la palabra alemana *quark*, que significa requesón, pero que en el habla popular se usa a veces como tontería o contrasentido. Para el lenguaje de la ciencia, ningún físico ha intentado la traducción de esta palabra, que en español debemos escribir cuark.

Indice

I. EL EXPERIMENTO DE McCUSKER

CUANDO una partícula eléctricamente cargada y no muy rápida entra a una cámara llena de vapor saturado, ioniza los átomos de éste y deja una traza que puede observarse. La ionización producida, y con ella el ancho de la traza, es proporcional al cuadrado de la carga de la partícula ionizante. Si se mide el ancho de las trazas, se tiene pues un método para determinar la carga de las partículas.

En 1968, un equipo de físicos australianos capitaneados por McCusker se dispuso a medir las trazas dejadas por los rayos cósmicos. Para ello emplearon cuatro de esas cámaras de niebla, dispuestas en forma tal que, para que se contara el paso de una partícula, tres de ellas deberían dispararse al mismo tiempo.

Durante un año, el grupo de Sidney examinó alrededor de 55 000 de esas trazas producidas por partículas muy energéticas. Al término de esta inmensa labor encontraron cuatro trazas ¡tan sólo cuatro! anómalas. En ellas, la ionización era menor que la observada en todas las demás, producidas por partículas con carga eléctrica igual a la de un electrón o a múltiplos enteros de ésta. Al comparar las ionizaciones, encontraron que su cociente era igual a **0.48 ± 0.05**, número muy cercano a **0.44 = 4/9**, o sea **2/3** al cuadrado. La famosa fotografía del grupo de McCusker parecería ser el primer indicio observado por científico alguno de una partícula con carga fraccionaria e igual a dos tercios de la carga del electrón.

Aparte de pacientes, los físicos australianos fueron cautos. Antes de permitir que el júbilo de un gran descubrimiento los apabullara, consideraron muchas posibles causas que pudieran ocasionar las cuatro trazas anómalas. Se preocuparon, por ejemplo, de cambios estadísticos en el número de iones producidos en la cámara de niebla; analizaron también si acaso la iluminación había sido defectuosa; en fin, buscaron otras posibles causas de error... Luego de eliminar una a una estas posibilidades, se decidieron a dar a conocer sus resultados en un artículo en las *Physical Review Letters*, en el número correspondiente a septiembre de 1969. Todo ello produjo una cascada de críticas.

R. K. Adair, físico de la Universidad de Yale, y otros investigadores del Laboratorio Nacional de Brookhaven, también de Estados Unidos, sugirieron poco tiempo después que la poca ionización observada por el grupo de Sidney se debía a electrones u otras partículas de baja energía y no a partículas de carga fraccionaria. Frauenfelder y un grupo de físicos de la Universidad de Illinois aseveraron que la gran velocidad de las partículas no había sido tomada en cuenta correctamente y —lo que no deja de ser interesante— se usó también el argumento siguiente: "si esas cargas fraccionarias se han visto en el experimento de Sidney, yo también las habría visto en el mío".

En todo caso, el artículo de McCusker y sus conclusiones fueron refutados. Otros físicos, celosos de un gran descubrimiento, arrasaron con los resultados de los australianos y lograron convencer a sus colegas de que la partícula con carga fraccionaria no había sido descubierta.

¿Por qué ese afán de tantos físicos en perseguir una partícula de carga fraccionaria? ¿Por qué tantos la buscan y reaccionan rápida y ferozmente cuando otros investigadores proclaman haberla hallado? Detrás de todo ello está el cuark, constituyente del protón y otras partículas, y que bien podría ser ese átomo que el hombre anhela hallar desde los tiempos de Demócrito.

Indice

II. UN VISTAZO AL ATOMISMO QUÍMICO

PARA entender el lugar que ocupa el cuark en las teorías actuales de la ciencia, echemos una ojeada a la historia del átomo, indivisible partícula con la cual se forma la materia.

Ya mencionamos a Demócrito y sus átomos de aire, fuego, agua y tierra. Platón tenía sus propias ideas sobre la constitución de la materia e imaginó que a estos cuatro elementos corresponderían los poliedros regulares: el tetraedro formaría el fuego y el octaedro, que puede descomponerse en dos tetraedros, sería el constituyente del aire; además, el cubo formaría la tierra y el icosaedro el agua. De los cinco poliedros regulares quedaría suelto el de doce caras iguales: el dodecaedro, que representaría al Universo como un todo. Aristóteles, el alumno más famoso de Platón, por su parte, tampoco aceptó las ideas atómicas de Demócrito. Por ello el concepto de átomo quedó en el olvido y de no ser por la filosofía mecanicista de Epicuro —ese filósofo griego tachado injustamente de hedonista— y el recuerdo que de ella nos dejó el poeta romano Lucrecio en su libro *De Rerum Natura*, publicado 56 años antes de Cristo, los átomos de Demócrito se habrían perdido.

La teoría atómica renace en el Siglo de las Luces. En una rápida sucesión de acontecimientos, que van de los brillantes trabajos de Lavoisier a la síntesis de Dalton, se estableció en forma cuantitativa la teoría atómica de la materia.

Lavoisier, nacido en París en 1743, hizo por la química lo que Galileo había logrado para la física dos siglos antes: enseñó a sus colegas la importancia de medir cuidadosamente. Además, también esclareció el problema de la combustión, demostró la ley de conservación de la masa, estableció las bases de la nomenclatura química moderna y, en 1789, escribió el primer libro de texto sobre química que contenía, entre otras muchas cosas, una lista de los elementos por entonces conocidos, es decir, de aquellas sustancias que no habían podido ser descompuestas en otras más simples: esa lista contendría los "átomos" a la Lavoisier.

Lavoisier cayó guillotinado cinco años después de publicar su *Traité élémentaire de chimie* (1789). Proust, otro gran químico francés, escapó de los azares de la Revolución Francesa; en España, donde trabajaba bajo la protección del rey Carlos IV, estableció la llamada ley de las proporciones múltiples: todos los compuestos químicos contienen elementos en ciertas proporciones bien definidas, independientemente del método usado para producirlos. Con ello se abría el camino a los trabajos de Dalton y al primer triunfo cientifico del atomismo.

El químico inglés John Dalton, nacido en 1766, se dio cuenta de que la ley de Proust podría explicarse fácilmente si se suponía que cada elemento estaba formado por partículas indivisibles. Dada la semejanza de su teoría con la que Demócrito había esbozado veintiún siglos antes, Dalton llamó a esas partículas *átomos.* La diferencia entre una teoría y otra, sin embargo, radica en la experimentación. El químico inglés, al sostener que los átomos de un elemento difieren de los de cualquier otro sólo en su masa, expuso su teoría atómica en forma cuantitativa, pues las diferencias de masa pueden medirse. Dalton logró, por así decirlo, la unión de Demócrito con Lavoisier.

Las ideas atómicas de Dalton fueron aceptadas en el mundo de los químicos (aunque no en el de los físicos) con inusitada rapidez. Con dos mil análisis de distintos elementos, el químico sueco Berzelius mostró una y otra vez que la ley de Proust funciona y con ella la teoría atómica. Berzelius mismo preparó la primera lista de pesos atómicos, antecesora de la tabla periódica de los átomos. Para designarlos, él mismo sugirió usar la inicial del nombre en latín (así, el oxígeno sería O, el hidrógeno H, y el azufre, S). Desgraciadamente, Berzelius no distinguió muchas veces entre átomos y moléculas, contribuyendo así a la confusión que reinaba en la química a mediados del siglo XIX.

Dado que entre los químicos no había acuerdo sobre las fórmulas de compuestos tan sencillos como el

ácido acético, por ejemplo, se sugirió que todos los químicos europeos importantes se reunieran y finalmente se pusieran de acuerdo. Esta reunión, que tuvo lugar en Karlsruhe, en 1860, fue de hecho el segundo congreso científico internacional de la historia.[1] La estrella del congreso fue el químico italiano Cannizzaro, quien expuso las ideas de otro científico italiano, Amadeo Avogadro, y logró aclarar la diferencia entre un átomo y una molécula —que es un conjunto de átomos—. Con ello, poco a poco, los pesos atómicos quedaron bien definidos y las fórmulas químicas se hicieron unívocas.

Entre los asistentes al congreso de Karlsruhe se hallaba un científico ruso, por aquel entonces de 36 años. Dimitri Mendeleyev, nacido en Siberia, era estudiante de Bunsen cuando escuchó la vehemente intervención de Cannizzaro en la reunión internacional y quedó vivamente impresionado. A su regreso a Rusia, ordenó los elementos de acuerdo a su peso atómico y pronto se dio cuenta de una periodicidad notable: la valencia del átomo —capacidad fija de cada elemento para combinarse con otros—subía y bajaba periódicamente. Si se colocaban los elementos en filas y columnas, siempre con átomos de igual valencia en la misma columna, se generaba una tabla periódica de los elementos. Las propiedades químicas de elementos en la misma columna resultaban muy semejantes entre sí.

Tan grande era la fe de Mendeleyev en su arreglo periódico de los átomos, que para ajustarse a él dejó huecos en su tabla y describió las propiedades químicas que tendrían los átomos que llenarían tales huecos. Cuando Lecoq de Boisbaudran descubrió el galio, Nilson el escandio y Winkler el germanio — usando, respectivamente, los nombres de sus países de origen[2]— la tabla periódica y con ella su autor, recibieron el reconocimiento científico; Mendeleyev se convirtió así en el químico más famoso del mundo, que impuso el orden en la lista de los átomos.

Es necesario aquí reconocer el invento de los científicos alemanes Bunsen y Kirchhoff que fue, tal vez, la pieza esencial para descubrir los nuevos elementos: el espectroscopio. Con este aparato se demostró que los átomos emiten luz sólo con algunas frecuencias características. Este conjunto de frecuencias recibió el nombre de *espectro* del átomo. Cada átomo tiene un espectro característico, que es como su huella digital. El entender esos espectros es, en parte, el objetivo de la teoría atómica moderna, que bien puede llamarse, como lo hace Weisskopf, la primera espectroscopía.

NOTAS

1 El primer congreso internacional tuvo lugar en Xochicalco, Morelos, cuando en el siglo XIII se reunió un grupo de astrónomos distinguidos que representaban a muchos pueblos mesoamericanos, habitantes de lo que hoy es México y Centroamérica.

2 El químico francés, quizá, jugó una broma al denotar al elemento número 31: no queda claro si usó el nombre de la Galia o el suyo propio —*gallus*, en latín—. De ser así, Lecoq de Boisbaudran inauguró la tradición de poner nombres de científicos ilustres a los elementos.

III. LOS ÁTOMOS QUÍMICOS DEJAN DE SERLO

LLEGAMOS así a las postrimerías del diecinueve, cuando en 1895 el físico alemán Roentgen descubre una misteriosa y penetrante radiación, que él llamó X. Roentgen produjo los rayos X jugando con un tubo de rayos catódicos —o tubo de Crookes, como entonces se le conocía—. En 1897, J. J. Thomson, científico inglés, esclarece la naturaleza de los rayos catódicos y demuestra que son partículas con una carga negativa -*e* y una masa igual a una pequeña fracción (que ahora sabemos que vale 1/1837) de la masa del átomo más ligero, el de hidrógeno. Así, Thomson descubre el electrón, partícula ubicua en la materia, y abre el camino de la física moderna, pues sugiere que el atomo de los químicos no es indivisible. En vez de ello, insinúa el físico inglés, el átomo es una esfera de carga eléctrica positiva en donde los electrones se encuentran dispuestos como las pasas en un pudín. Entre paréntesis, al demostrarse que los rayos catódicos son partículas cargadas, quedó claro también lo que origina los rayos X: éstos no son otra cosa que radiación electromagnética producida al frenar bruscamente los electrones cuando chocan con la pantalla del tubo de Crookes. Por este mismo fenómeno se producen rayos X en las pantallas de televisión o en los monitores de las microcomputadoras.

Contemporáneos a Roentgen y a Thomson fueron Becquerel y los Curie. Un año después de Roentgen, Henri Becquerel descubrió otro tipo de rayos misteriosos, que estudiaban también los esposos Curie. Ernest Rutherford, físico neozelandés discípulo de Thomson, clasificó las recién llegadas radiaciones en tres tipos: α, β *y* γ. La primera consiste de partículas con carga positiva y masa casi igual a la del átomo de helio, el segundo elemento de la tabla de Mendeleyev. Hoy sabemos que el segundo tipo de rayos, los β, son iguales a los electrones de Thomson; y la tercera radiación, la γ, es de la misma naturaleza que los rayos X —o sea, radiación electromagnética, como la luz— aunque con un poder de penetración y una energía mucho mayores.

Así como Bunsen y Kirchhoff usaron la luz como elemento de análisis químico en su espectroscopio, Rutherford ideó usar las partículas de la radiación ***a*** para analizar el átomo. Al lanzar esas partículas contra laminillas de oro encontró, para su gran sorpresa, que algunas de ellas rebotaban cual si chocaran contra un objeto casi puntual, muy masivo, de carga positiva, que se encontrara en el centro de los átomos. Un modelo de cargas dispersas, como el propuesto por su maestro Thomson, no podría dar cuenta cabal de las observaciones de Rutherford. Por ello, el gran experimentador neozelandés propuso un nuevo modelo atómico, que recuerda a un sistema solar en miniatura: el átomo está formado por electrones que dan vuelta alrededor de un núcleo cargado positivamente, que los atrae con la fuerza eléctrica de Coulomb. El núcleo masivo juega el papel del Sol, los electrones actúan como si fueran los planetas, y la fuerza eléctrica entre cargas opuestas reemplaza la atracción gravitacional que introdujo Newton varios siglos antes.

Con esta serie de brillantes descubrimientos, quedaba expuesto claramente el problema de la espectroscopía atómica, la primera espectroscopía. ¿Por qué existen los espectros ópticos de los átomos? ¿Por qué constituyen una huella digital de cada elemento químico? La respuesta sólo podría encontrarse luego de la revisión más profunda hecha hasta entonces sobre la naturaleza de las cosas materiales: la revolución cuántica.

Indice

IV. LAS CATÁSTROFES ULTRAVIOLETA Y ATÓMICA

MIENTRAS los grandes experimentadores de finales del siglo XIX se hallaban ocupados en descubrir partículas y radiaciones, los teóricos de los albores del nuevo siglo no se quedaban quietos sentados tranquilamente en sus lares: la mecánica de Newton y el electromagnetismo de Maxwell. En efecto, el gran teórico alemán Max Planck habría de conmocionar al mundo científico cuando en 1900 resolvió un viejo problema, a costa de sacrificar ideas muy enraizadas. Para eliminar la así llamada catástrofe ultravioleta,[1] Planck debió suponer que la energía de las ondas electromagnéticas viene en paquetes, que él llamó cuantos. Sólo cinco años después, Einstein reforzó las ideas de Planck al sugerir que la luz está formada por fotones, partículas de luz cuya energía es proporcional a la frecuencia de la onda electromagnética. Esta última, según la teoría de Maxwell y sus múltiples comprobaciones posteriores, es la radiación que forma la luz.

Tanto en el trabajo de Planck sobre la radiación del cuerpo negro y la eliminación de la catástrofe ultravioleta, como en el trabajo de Einstein, que explica el efecto fotoeléctrico en que un rayo de luz arranca electrones de un metal, hace su aparición la hoy famosa constante *h*, llamada de Planck. La energía *E* del fotón, el cuanto de luz, y la frecuencia ***v*** de la onda electromagnética se ligan a través de la constante de Planck:

$$E = hv.$$

El valor de *h* necesario para ajustar los datos experimentales del cuerpo negro y del efecto fotoeléctrico es el mismo y resulta muy pequeño cuando usamos unidades propias para entender los fenómenos de nuestra vida cotidiana. En el sistema CGS (centímetro-gramo-segundo) la constante de Planck toma el pequeñísimo valor

$$h = 6.625 \times 10^{-27} \text{ (grs. cm}^2/\text{s}^2\text{)}.$$

La pequeñez de *h*, como veremos, nos explica muchas cosas. En particular, la razón por la cual la mecánica de Galileo y Newton basta para explicar el movimiento de los cuerpos grandes.

Empero, después de los descubrimientos de Rutherford y su propuesta del modelo planetario del átomo, restaba una catástrofe, la catástrofe atómica. En efecto, si el átomo es como un sistema solar minúsculo, mantenido por fuerzas eléctricas y sujeto a las leyes mecánicas de Newton y a las leyes electromagnéticas de Maxwell, tiene una vida por demás efímera. Una carga acelerada, según la teoría clásica, radia energía al emitir ondas electromagnéticas. Esa energía la toma de su movimiento, disminuyendo siempre su velocidad. Con ello se acerca cada vez más al centro que lo atrae. La teoría clásica —como llaman ahora los físicos a la ciencia vigente en el siglo XIX— predice que cada electrón caería al núcleo atómico en apenas una diezmillonésima de segundo. En consecuencia, los átomos y la materia por ellos formada serían inestables. Para empeorar aún más las cosas atómicas, el espectro atómico resulta también inexplicable con la teoría clásica. La frecuencia de la luz radiada por los electrones que simulan planetas es continua y no contiene rastros del espectro atómico, formado por líneas de luz con frecuencias discretas.

El primer físico que aventuró una hipótesis razonable para eliminar esta catástrofe atómica fue el gran científico danés Niels Bohr, cuyo centenario celebramos en 1985. Bohr viajó de su natal Dinamarca a Manchester en 1913, para trabajar en el laboratorio de Rutherford. Allí tuvo una idea brillante: entre las posibles órbitas que un electrón puede recorrer alrededor del núcleo hay algunas de carácter especial. Esas órbitas son estacionarias, pues un electrón permanece ahí si no se le perturba. El átomo sólo emite luz cuando el electrón va de una órbita estacionaria a otra. La frecuencia de esa luz está ligada, otra vez, con la constante de Planck: *hv* es la diferencia de energía entre las órbitas estacionarias. Todo ello parece un juego de niños, una simple casualidad matemática, pero Bohr logró de esta manera correlacionar los datos

observados por los ópticos del siglo pasado y explicar el espectro del átomo más simple, el de hidrógeno. En todo caso, *h* vuelve a hacer su aparición en la física atómica.

Si bien las ideas de Bohr no fueron refutadas, en sí no constituían una teoría del mundo atómico. Esta comienza a tomar forma cuando el noble francés Louis de Broglie escribe su tesis doctoral en 1924 y propone que a toda partícula debe asociarse una onda, cuyas características dependen del estado dinámico de la partícula. Por ejemplo, si la partícula es libre, sólo su momento lineal ***p*** —igual al producto de su masa por su velocidad— basta para determinar su estado de movimiento; en tal caso, la longitud de onda asociada es igual a ***h/p***. Se da origen así a la dualidad partícula-onda.

Poco después de que De Broglie presentó sus ideas sobre la mecánica ondulatoria, el físico austriaco Erwin Schrödinger supuso que la relación de De Broglie es válida para toda partícula, incluso para un electrón dentro del atomo. Las órbitas estacionarias de Bohr serían aquellas para las cuales un número entero de longitudes de onda pudieran acomodarse en el perímetro de la órbita. Esto sólo era posible para ciertos valores de la longitud de onda, por consiguiente del momento lineal y, por tanto, de la energía. Volvían a aparecer los valores discretos de la energía y con éstos una explicación natural de los espectros atómicos.

Sin embargo, la dualidad partícula-onda debe repugnar a todo físico que se respete. Para definir una partícula, un punto material, se requiere un conjunto de operaciones en buena medida opuestas a las necesarias para precisar lo que es una onda. Partícula y onda son conceptos complementarios y de ninguna manera puede satisfacernos un concepto *ad hoc* como el de complementaridad, de acuerdo al cual un electrón a veces actúa como onda y a veces como partícula, según convenga al experimento que deseemos interpretar.

La solución a esta paradoja la dio un joven físico alemán, Werner Heisenberg, al postular el principio de incertidumbre. Ocurre que la posición y la velocidad de una partícula no pueden medirse al mismo tiempo. Si se quiere precisar dónde está la partícula, su momento lineal se vuelve indefinido, y viceversa: al tratar de definir la velocidad dentro de límites estrechos, se conoce menos dónde se halla la partícula. En forma más precisa, el principio que Heisenberg dio a la física moderna dice que el producto de la indeterminación del momento lineal por la incertidumbre en la posición es una cantidad del orden de *h*, la constante de Planck dividida por ***2π:***

$$\hbar = 2 / 2\pi$$

Cuando $\hbar$ es despreciable, casi cero, momento lineal y posición pueden definirse con tanta acuciosidad como se desee; en tales casos, las órbitas clásicas existen y recuperamos lo bien sabido en la mecánica de Newton. Esto ocurre cuando tratamos con cuerpos grandes, como los planetas o una pelota de futbol. Ellos se mueven como si $\hbar$ fuera cero y el principio de incertidumbre no actuara. Empero, cuando la masa de la partícula es muy pequeña, como la de un electrón que vale del orden de $\mathbf{9 \times 10^{-28}}$ gramos, el principio de Heisenberg entra en acción y las nociones clásicas pierden validez; en particular, la trayectoria de un electrón no existe.

Si en una teoría se elimina un elemento, otro ha de reemplazarlo. Si ya no existen las trayectorias clásicas sino las ondas de De Broglie o de Schrödinger, ¿cómo es que éstas reemplazan al viejo concepto de órbita? La respuesta a esta crucial pregunta, necesaria para formular un cuadro teórico coherente y completo, la dio Max Born, poco después de que Schrödinger y Heisenberg postularan las ideas anteriores. Según Born, la onda que acompaña a la partícula da la probabilidad de encontrarla. Donde la onda es nula, es imposible hallar la partícula. Pero en aquellas zonas del espacio donde la amplitud de esa onda sea distinta de cero, sabemos que es probable encontrar a la partícula, aunque nunca tengamos la certeza completa. El principio de Heisenberg destruyó la certidumbre y el determinismo clásicos; por ello se le llama el principio de incertidumbre. Es, sin duda, uno de los pilares de la física actual.

NOTAS

1 Esta catástrofe ultravioleta surge al estudiar la radiación electromagnética de un cuerpo negro, que no es otra cosa que una cavidad con ondas electromagnéticas dentro y a la cual se ha hecho un agujerito por donde pueda escapar la radiación. Si para estudiar este problema, se unen la mecánica a la teoría electromagnética y a la mecánica estadística clásicas, resulta que, mientras mayor sea la frecuencia de las ondas mayor es la energía emitida por el cuerpo negro. Esto no concuerda con lo observado experimentalmente y repugna desde el punto de vista teórico. Por eso constituye una catástrofe. Como además, ocurre a frecuencias altas, como la de la luz ultravioleta, tal desastre de la física decimonónica recibió el sugerente apelativo de catástrofe ultravioleta.

Indice

V. TEORÍA CUÁNTICA DE LOS ÁTOMOS COMPLEJOS

ESA nueva física, basada en nociones probabilísticas y en el principio de incertidumbre, es heredera de los viejos cuantos de Planck. Por ello se le conoce como mecánica cuántica. Con la teoría cuántica se han podido explicar las propiedades de los átomos y moléculas, las reacciones entre ellos y sus consecuencias químicas. En particular, podemos entender las regularidades que Mendeleyev plasmó en su tabla periódica de los elementos químicos.

Los químicos del siglo pasado sabían bien que el hidrógeno era el elemento más ligero y que su átomo sería el más simple: en el modelo planetario un electrón con carga *e* daría vueltas atraído eléctricamente por el primero de los núcleos, el protón. La ecuación de la mecánica cuántica, llamada ecuación de Schrödinger, puede resolverse en este caso y a su solución se le llama la función de onda ψ, relacionada con la probabilidad de encontrar al electrón en distintos puntos del espacio que rodea al protón.

La función ψ tiene tres características: tamaño de la región en el espacio donde ψ no es nula, su forma geométrica y su orientación. La primera característica de la función ψ equivale al tamaño del átomo, es decir, de la región donde está confinado el electrón. Esto fija la longitud de onda λ típica que debe asociarse al electrón dentro del átomo. De acuerdo al principio de incertidumbre, el momento lineal correspondiente debería ser del orden de $\hbar / \lambda$. Como la energía cinética es $\mathbf{p^2/2m_e}$, donde $\mathbf{m_e}$ es la masa del electrón, λ determina la energía del átomo de hidrógeno. En otras palabras, el tamaño de un sistema cuántico está relacionado con su energía. Mientras menor sea la región de confinamiento, más energía se requiere para mantenerlo estable.

Podemos tener una idea del tamaño del átomo de hidrógeno, cuyo radio es **R**, si igualamos la energía eléctrica que lo confina, $\mathbf{e^2/R}$, a la energía cinética que el confinamiento induce,

$$\frac{p^2}{2m_e} \approx \frac{\hbar^2}{2m_e R^2}$$

De aquí resulta que $\boldsymbol{R = \hbar^2/m_e e^2}$ que, por cierto, es la única combinación de $\hbar$, $\mathbf{m_e}$ y **e** que tiene las dimensiones de longitud. El radio se conoce como el de Bohr y vale $\mathbf{0.5 \times 10^{-8}}$ centímetros. Si el átomo fuera del tamaño de una pelota de futbol por ejemplo, un hombre tendría una altura bastante mayor que la distancia entre la Tierra y la Luna. ¡Así de pequeños son los átomos! No ha de extrañarnos, pues, que las leyes físicas que rijan en el mundo de los minúsculos átomos sean distintas a las que vemos en acción en nuestra vida diaria.

Una vez que conocemos *R*, podemos estimar las energías típicas de un electrón dentro del átomo. Obtenemos que esa energía *E* es del orden de $\mathbf{m_e e^4/2\hbar^2}$, equivalente a $\mathbf{20 \times 10^{-12}}$ ergs, donde el *erg* es la unidad de energía en el sistema CGS.[1] Como vestigio de las órbitas cuantizadas de Bohr, la energía del electrón sólo puede tomar ciertos valores discretos. Con ello, la teoría cuántica explica el espectro del átomo de hidrógeno, que había sido observado por Balmer, Lyman y otros ópticos del siglo diecinueve.

La segunda característica de ψ es su forma geométrica. De la misma manera en que hay tamaños discretos de ψ**,** así sólo algunas formas de ψ satisfacen la ecuación de Schrödinger. Con ψ entra en la física la forma geométrica. Resulta curioso, pero no había en la teoría clásica de la física algo relacionado con la forma de las cosas. Y eso a pesar de que la naturaleza está llena de formas, desde las facetas de un cristal a los pétalos de las flores.

Según sea la forma de ψ, sus propiedades ante las rotaciones cambian. Dinámicamente, en la antigüedad se sabía que el momento angular **1** caracteriza las propiedades de rotación de un sistema físico. Distintas formas de ψ**,** pues, corresponden a diferentes valores del momento angular. Y sólo ciertas formas son permitidas porque solamente ciertos valores del momento angular **1** son posibles. Esta variable dinámica, al igual que la energía, toma valores discretos: está cuantizada, como dicen los físicos.

La teoría de Schrödinger para el átomo de hidrógeno resultó satisfactoria hasta que se enfrentó a un nuevo hecho experimental. Los físicos alemanes Stern y Gerlach hicieron pasar un haz, formado por átomos de hidrógeno, entre los polos de un imán asimétrico, de diseño especial; observaron que el haz se parte en dos. Ello significa que el átomo de hidrógeno, neutro eléctricamente, tiene propiedades magnéticas que la teoría anterior no contiene ni logra explicar. Hubo que enmendar la teoría de Schrödinger y asociarle un momento magnético al electrón, como si fuera un cuerpo cargado en rotación. A esta rotación intrínseca se le llamó espín (de la palabra inglesa *spin*, que significa giro). El espín, como toda variable dinámica en la teoría cuántica, también está cuantizado. Los resultados del experimento de Stern y Gerlach indican dos posibles orientaciones del espín del electrón, por lo que decimos que esta partícula tiene espín igual a **1/2:** sus dos orientaciones son hacia arriba, proyección +**1/2,** o hacia abajo, proyección del espín igual a **-1/2**. Como luego veremos, el espín es una propiedad ubicua e importantísima en el mundo microscópico. Todas las partículas muy pequeñas tienen espín.

Átomos más complejos que el hidrógeno constan de muchos electrones, digamos **Z**, que orbitan alrededor de un núcleo con carga positiva. Ya que el átomo es neutro eléctricamente, el núcleo más pesado debe tener más carga, siempre un múltiplo entero de la carga *e* del protón. A **Z** se le llama el número atómico. Mientras más grande sea **Z**, menor resulta la repulsión entre los electrones comparada con la fuerza de atracción que sobre cada uno ejerce el núcleo. Ello conduce a órbitas electrónicas de menor tamaño. En conclusión, mientras más pesado el átomo, menor debería ser su tamaño.

Experimentalmente sabemos que la última afirmación es falsa. Algo mal debe haber en el razonamiento anterior. Lo que ocurre es que no todos los **Z** electrones caben en la misma órbita. Los electrones pertenecen, dentro del zoológico cuántico, a un tipo de partículas que son muy poco sociables, que repelen a sus semejantes. Si un electrón tiene una cierta energía, o una velocidad, o una posición dada, en fin, si está en un cierto estado cuántico, otro electrón no cabe ahí. Con este principio, que Pauli postuló y llamó el principio de exclusión, podemos entender el tamaño y la estructura no sólo de átomos complejos, sino también de los núcleos y de muchos otros sistemas cuánticos. El principio de Pauli es una de las piedras angulares de la física cuántica y sus aplicaciones; nunca se ha encontrado una violación a sus mandatos.

NOTAS

1 Cuando se usan tantas potencias de **10** los cálculos se vuelven engorrosos y la memoria falla. Esas potencias negativas de **10** aparecen al hablar de átomos porque el sistema de unidades empleado es conveniente cuando se trata con sistemas físicos a la escala del hombre. Si se describen sistemas muy grandes, como las galaxias, o muy pequeños, como los átomos, es conveniente usar sistemas de unidades a la medida. Así, $\hbar^2/m_e e^2$ es la longitud natural para los átomos y $m_e e^4/2\hbar^2$ es la unidad natural de energía.

Por ello se introdujeron el **Å**ngstrom (**Å**), igual a 10^{-8} cm> y el electrón-voltio (eV), igual a 1.6×10^{-12} erg y a la energía que una carga eléctrica igual a la del electrón adquiere cuando se le acelera con una diferencia de potencial de un volt. El radio de Bohr vale medio Ángstrom, aproximadamente, y la energía para arrancarle un electrón al átomo de hidrógeno equivale a 13.6 eV.

VI. EL NÚCLEO Y SU ESTRUCTURA

CON la mecánica cuántica y sus principios de incertidumbre y de exclusión a la mano, se pudo entender mucho acerca de los átomos, las moléculas y la forma en que reaccionan. En particular, fue posible comprender el orden que Mendeleyev había hallado en su tabla periódica de los elementos. Asimismo, la química y sus reacciones encontraron un sustento en términos de conceptos más básicos. Al unirse dos o más elementos químicos, sus electrones orbitales se rearreglan para buscar la situación más estable. Todo ello es reflejo y consecuencia de la fuerza eléctrica; por lo tanto, las energías involucradas en las reacciones químicas son del orden de los eléctrón-voltios.

Una de las conclusiones que podemos obtener de lo anterior es la siguiente: el átomo de los químicos no lo es en sentido estricto. Es un sistema compuesto por un núcleo y electrones. No es, pues, esa partícula indivisible que primero imaginó Demócrito. Nuestra búsqueda de lo verdaderamente elemental debe, en consecuencia, continuar.

Aunque ya podríamos sospechar que el núcleo de los átomos tampoco es una partícula elemental, es necesario para nuestro relato detenernos un poco en él. Esto lo hacemos no sólo porque fue el camino seguido históricamente por los científicos, sino porque de la física nuclear surgen dos nuevas fuerzas, las interacciones fuerte y débil, que juegan un papel crucial en nuestra historia.

Ya mencionamos que el núcleo delata su existencia porque se desintegra, como observaron Becquerel y los Curie cerca de quince años antes que Rutherford sugiriera la existencia de una partícula positiva y muy masiva en el corazón del átomo. El mismo Rutherford, en 1909, demostró que las partículas ***a*** son núcleos de helio, el segundo elemento en la tabla periódica de Mendeleyev. Los rayos β, por su parte, son electrones. Si del núcleo salen electrones y protones, nada más natural, entonces, que suponer al núcleo formado por ellos, que se atraen eléctricamente. Nótese que, por sí sola, esta fuerza no podría mantener ligados a los protones, pues por ella se repelen y no formarían un núcleo estable.

Sin embargo, un núcleo formado por protones y electrones ligados eléctricamente tampoco es viable. Y ello al menos por dos razones fundamentales. La primera tiene que ver con el principio de exclusión. Como ya dijimos, hay partículas poco sociables, que no gustan de compartir su estado con otras semejantes. Los electrones son de este tipo; también los protones pertenecen a esta clase de partículas, que los físicos conocen como fermiones. En la taxonomía de los sistemas microscópicos existen otros que se comportan en cierta medida de manera opuesta a los fermiones. A este nuevo tipo, que llamamos bosones, nada les impide ocupar el mismo estado que sus semejantes. Un teorema de la física cuántica nos dice que un sistema microscópico o es fermión o es bosón; además, los fermiones tienen un espín semientero y los bosones un espín entero. Así, cuando juntamos un número par de fermiones, se produce un bosón.

Tómese entonces un núcleo como el de nitrógeno catorce que, según el modelo del núcleo constituido por protones y electrones, debería constar de catorce de los primeros y siete de los últimos, para que su carga eléctrica fuera la correcta. En tal caso, el núcleo de nitrógeno catorce tendría un número non (igual a veintiuno) de fermiones y sería, en consecuencia, él mismo un fermión. Pero el núcleo de nitrógeno catorce es un bosón, según pudo observarse directamente. Un simple modelo no puede contradecir un principio general como el de Pauli. Si este último prevalece, el modelo ha de abandonarse.

La segunda razón para dejar de lado al electrón como constituyente del núcleo se basa en un argumento cuántico, semejante al que ya dimos para explicarnos el tamaño del átomo de hidrógeno. Como bien supuso Rutherford, el núcleo es muy pequeño comparado con el átomo. Este último, recordemos, tiene órbitas cuyo tamaño es del orden de un **Å**ngstrom, es decir, de $\mathbf{10^{-8}}$ cm. El núcleo es cien mil veces menor, y para no cargar otra vez inútilmente con potencias de diez, se inventó la unidad de longitud nuclear apropiada. A ésta le llamamos fermi, en honor del ilustre físico italiano Enrico Fermi, y vale $\mathbf{10^{-13}}$ cm, o sea, una cienmilésima de un **Å**ngstrom. Si ahora tratamos de confinar a partículas como los protones, cuya

masa es cercana a 2000 veces la del electrón, en una región tan pequeña, el principio de Heisenberg nos exige una fuerza cien veces más intensa que la eléctrica. Otra vez el modelo falla.

Pero entonces, ¿cuáles son los constituyentes del núcleo? La respuesta la dio Heisenberg,[1] luego de que el físico inglés Chadwick descubrió en 1932 otra partícula cuyas propiedades son muy semejantes a las del protón excepto que es eléctricamente neutra. Por ello se le llamó neutrón. Chadwick, uno más de los egresados de la fructífera escuela que Ernest Rutherford creó en Manchester, descubrió al neutrón cuando bombardeó núcleos de berilio con partículas alfa, de donde salía una radiación misteriosa que se detenía en la parafina, expulsando protones de ella. Esta radiación consistía de una nueva partícula, que al igual que el protón obedece al principio de exclusión de Pauli, y que es el otro constituyente del núcleo atómico: el neutrón. Los diferentes elementos tienen núcleos formados por **Z** protones, que le confieren una carga positiva **Z***e*, y por **N** neutrones. Así, el nitrógeno catorce de nuestro ejemplo estaría formado por siete neutrones y siete protones, o sea, un número par de fermiones; sería, por lo tanto, un bosón. La contradicción que antes mencionamos desaparece.

Una dificultad desaparece y otra se crea: si los neutrones no tienen carga, ¿qué fuerza los mantiene unidos entre sí y a los protones para que el núcleo sea estable? Esa fuerza no puede ser ya la eléctrica, porque ésta no actúa sobre los neutrones y, además, porque no es lo suficientemente intensa para confinar una masa como la del neutrón o del protón en una región cuyo radio fuera del orden de unos cuantos fermis. Por esta misma razón, la fuerza gravitacional no basta, pues es muchísimo menor que la electromagnética: a la distancia de un fermi entre dos protones, la atracción gravitacional entre ellos sería $\mathbf{10^{-36}}$ veces menor que la repulsión eléctrica. Nos encontramos, pues, ante una nueva fuerza: la interacción fuerte o fuerza nuclear. Esta nueva fuerza es más complicada que la eléctrica o la gravitacional, pues depende de muchas características de los nucleones. Entender la estructura del núcleo nos enfrenta entonces a un problema formidable: muchos cuerpos, Z protones y N neutrones, interactúan con una fuerza muy complicada y en buena parte desconocida: la interacción fuerte. De ahí se deben deducir las funciones de onda nucleares —su tamaño, su forma y orientación—. Se encuentra, así, como en el caso atómico, que los espectros nucleares también existen. Es decir, un núcleo aislado sólo puede encontrarse en un conjunto discreto de tamaños y de formas, o sea, de energías y momentos angulares. Entramos así a la espectroscopía nuclear, la segunda espectroscopía, como la llamaría Weisskopf.

NOTAS

1 En la biografía de Fermi, premio Nobel de física, Emilio Segré relata una historia curiosa: Ettore Majorana, sarcástico colega de Enrico Fermi, comentó, al saber de los experimentos de los Curie-Joliot, que habían descubierto el "protón neutro", y no lo habían reconocido. Majorana inventó entonces el modelo del núcleo formado por protones y neutrones. Fermi le instó a que lo publicara, pero Majorana se rehusó. Entonces le pidió su autorización para exponer sus resultados, dándole el debido crédito, en la conferencia internacional que tendría lugar en París, en julio de 1932. Majorana aceptó con la extraña condición de que sus ideas fueran atribuidas a un anciano profesor de ingeniería, que habría de asistir al congreso. Por ello las ideas de Majorana quedaron en el cajón y sólo se conocieron mucho tiempo después.

VII. LA FÍSICA CUÁNTICA Y RELATIVISTA

HAGAMOS una pausa en el relato para regresarnos a 1905, año en que Albert Einstein fue al fondo de las cosas y revisó con esmero los conceptos de espacio y de tiempo por entonces vigentes. Einstein creó la teoría de la relatividad, según la cual no puede haber ninguna partícula que se mueva con una velocidad mayor que la de la luz en el vacío. De esta simple proposición se deduce que el tiempo fluye de manera relativa al observador y que depende de su estado de movimiento. Esta críptica frase quiere decir, entre otras cosas, que dos eventos simultáneos para un físico cualquiera que los observe, no lo serían para otro observador que se moviera respecto al primero. El tiempo absoluto de Newton cede su lugar en la física a una velocidad absoluta, la de la luz, que es la máxima existente en la naturaleza. Cuando la velocidad de un cuerpo cualquiera es mucho menor que la de la luz, ésta aparenta ser infinita; ya no existe, para todo propósito práctico, un límite a la velocidad de cuerpo material alguno. La mecánica relativista predice entonces lo mismo que la newtoniana. En otros términos, la relatividad sólo es crucial al tratar con partículas muy rápidas, que se mueven con velocidades cercanas a la de la luz. Por ello, en nuestra vida diaria los efectos relativistas son despreciables y el tiempo parece absoluto. Por ejemplo, la velocidad de un avión comercial hoy en día es del orden de 900 km/h, que es mil millones de veces menor que la velocidad *c* de la luz en el vacío, la cual vale 300 mil kilómetros por segundo: ni aun con estos aviones notaríamos la diferencia entre las teorías newtonianas y las relativistas.

Otra consecuencia de la relatividad —que será crucial para entender el resto de nuestra historia— es la equivalencia entre masa *m* y energía en reposo *E*:

$$E = mc^2$$

La relación anterior nos dice que la masa se puede convertir en energía, y viceversa: si tenemos la suficiente cantidad de energía podremos crear partículas con masa. Esto no es ciencia ficción, pues hoy se comprueba día tras día con la operación de las plantas nucleares, por citar tan sólo un caso.

Cuando se definió la teoría cuántica a mediados de los veintes, la física relativista había ya sentado sus reales en la ciencia. Nada más natural, entonces, que buscar una teoría que fuese al mismo tiempo cuántica y relativista. Esto fue, precisamente, lo que grandes físicos de la época —Wolfgang Pauli y Paul Dirac, entre otros— intentaron. La empresa no resultó tan fácil, sin embargo; hoy día, cincuenta años después, la física cuántico-relativista adolece de varias fallas. No obstante, algunos resultados están firmemente establecidos y constituyen parte esencial de la física moderna.

Para nuestro relato, tres de estos resultados son cruciales: la existencia de las antipartículas, la relación entre espín y estadística y la existencia de los portadores de la interacción.

Las antipartículas fueron sugeridas por Dirac en 1931, al buscar una ecuación relativista y cuántica que rigiera el comportamiento de los electrones. La conclusión inevitable se vino encima al gran físico inglés: si existe una partícula también debe existir la correspondiente antipartícula. Éstas tienen muchas propiedades idénticas a sus respectivas partículas pero difieren en otras, en su carga electrica, por ejemplo: si un electrón tiene carga negativa, el antielectrón la tiene positiva; y el antiprotón debe estar cargado negativamente con una carga -*e*, idéntica en valor a la del electrón. Por esta última peculiaridad, Dirac mismo se confundió al principio y pensó que, tal vez, protón y electrón serían uno la antipartícula del otro. Sin embargo, esto no es cierto: partícula y antipartícula siempre tienen además de igual espín la misma masa.

La confusión de Dirac pronto se aclaró, sin embargo. Un joven físico norteamericano, por aquel entonces de veintisiete años y a escasos dos de haber obtenido el doctorado, estudiaba fotografías de las trazas que dejaban en una cámara de niebla los rayos cósmicos. Éstos, muy energéticos, no se podían desviar ni aun en campos magnéticos muy intensos. La desviación depende de la masa y de la carga eléctrica de la

partícula afectada y, sobre todo, de su energía: a mayor carga más curvatura y la desviación es menor cuando la masa y la energía crecen. Por ello Anderson blindó la cámara de niebla con plomo para bajar la energía de las partículas cósmicas, que luego se curvaban dentro del campo magnético. Así trabajaba Anderson con paciencia, cuando se cruzó por su camino una partícula, en todo idéntica al electrón pero que se curvaba al revés, como si tuviera la carga opuesta. Pronto se dio cuenta que había descubierto la antipartícula del electrón, el antielectrón, que él llamó positrón. No cabe duda que Anderson tuvo más suerte con su cámara de niebla que McCusker con la suya, pues sus colegas sí reconocieron su descubrimiento del positrón.

Poco después se demostró la propiedad más singular de la pareja partícula-antipartícula. El encuentro de las dos resulta explosivo, pues se aniquilan, dejando como rastro tan sólo energía en forma de rayos γ, de cuantos de luz. Como al cuark en la década de los sesentas, al positrón lo perseguían varios grupos de investigadores en todo el mundo. Además de Anderson, que trabajaba en California, Blackett en Manchester y los esposos Irene (hija de Marie) Curie y Federico Joliot-Curie en París también buscaban afanosamente comprobar o desmentir al gran Dirac. Anderson se les adelantó, pero tres años después Blackett tomó venganza: mostró que un rayo γ, al pasar a través de plomo, podía desaparecer dejando un par electrón-positrón. ¡Y esto siempre ocurría de acuerdo con la fórmula famosa de Einstein, $E=mc^2$, por lo que fue la demostración experimental más dramática de esta ecuación! Los dos procesos, aniquilación partícula-antipartícula y creación de pares, inverso uno del otro, son pues posibles, tal como indica la teoría cuántico-relativista. En 1932 ocurren, por lo tanto, dos grandes descubrimientos que, en buena medida, marcan el inicio de lo que hoy llamamos física de partículas elementales: los hallazgos del neutrón, que junto con el protón forma el núcleo, y del positrón, que es el antielectrón. Empieza así a poblarse el zoológico del mundo subnuclear, lleno de partículas pequeñas y veloces. A los primeros en llegar, el protón y el electrón, se agregan en ese año el positrón y el neutrón.

El segundo resultado de la teoría cuántico-relativista es el teorema de Pauli sobre la relación entre espín y estadística. El espín ya lo hemos descrito; se refiere a una rotación intríseca de las partículas cuánticas. Es un concepto totalmente cuántico, como lo prueba el hecho de que el espín se mide en unidades de $\hbar$, la constante de Planck. Cuando $\hbar$ puede despreciarse, lo cual es posible al tratar con cuerpos grandes, el espín no aparece. Pero al considerar sistemas microscópicos, cuyas variables dinámicas toman valores a la escala de $\hbar$, el espín puede valer un múltiplo entero de $\hbar$, como $0, \hbar, 2\hbar, \ldots$, o un múltiplo semientero de la misma constante, tal y como $\hbar/2$, $3\hbar/2$,.... El espín no es sólo un concepto cuántico, sino también relativista; aunque podría entenderse con la mecánica cuántica no relativista, surge de la manera más natural de la misma ecuación relativista de Dirac que se usa para describir electrones y positrones. Antes de Dirac, y para explicar el experimento de Stern-Gerlach como ya mencionamos, hubo que parchar la teoría de Schrödinger, añadiéndole el concepto de espín.

El otro término, estadístico, no lo hemos usado como tal, aunque su significado ya lo empleamos. Se dice que una partícula obedece la estadística de Fermi-Dirac cuando es antisociable por esencia, cuando es un fermión que actúa de acuerdo con el principio de exclusión; y se dice que una partícula obedece la estadística de Bose-Einstein cuando se comporta de manera contraria, cuando le gusta estar cerca de sus congéneres; es entonces un bosón no regido por el principio de Pauli.

Pues bien, el teorema que Pauli demostró usando la teoría cuántica-relativista es el siguiente: las partículas elementales se dividen en dos y solamente en dos clases, los fermiones y los bosones; aquellas que son fermiones tienen un espín semientero, mientras que las partículas de espín entero obedecen la estadística de Bose-Einstein. Nótese que, entonces, el electrón y el positrón, así como el neutrón y el protón son, como ya dijimos, fermiones. El cuanto de luz, el fotón, por su lado, tiene espín igual a h y es, en consecuencia, un bosón. Debemos hacer notar que el teorema de Pauli requiere que las partículas sean elementales, es decir no compuestas, y que supone la posibilidad de hallarlas libres.

VIII. LOS MENSAJEROS DE LA INTERACCIÓN

EL TERCERO de los resultados en que se conjugan la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad demuestra la existencia de los portadores de la interacción. Vale la pena entretenernos un momento aquí pues en lo que sigue se verá en todo su esplendor cómo razonan los buenos físicos, con unos cuantos principios básicos a la mano, para sacar conclusiones de carácter muy general.

Pensemos cómo interactúa una persona con otra alejada de ella, si se encuentran ambas en un cuarto obscuro. Una de las personas desea enviarle un mensaje a la otra, para tener acción sobre ella. La respuesta es sencilla: le habla y pasa así el mensaje. ¿Qué diría un físico clásico sobre este sencillo proceso, tan común en nuestra vida diaria? Pues diría que una de las personas, el emisor, crea a su alrededor un campo de ondas sonoras, las cuales luego son captadas por el receptor, que descifra en su cerebro la señal. El campo, en este caso, está formado por las compresiones y rarefacciones del aire que se producen en el cuarto obscuro. Ellas forman una onda longitudinal que se propaga con la velocidad del sonido en el aire, que vale unos 340 m/s. En el proceso se conserva la energía, pues la de las ondas sonoras provino del esfuerzo que hizo la persona emisora al gritar.

Un físico cuántico, al pensar en la interacción de dos partículas microscópicas razonaría de la misma manera: una de las partículas crea un campo a su alrededor, que luego es detectado por la otra, que así resiente la presencia de la primera. Pero, ¿qué diría de la conservación de la energía? ¿Actúa en la misma forma este principio general de la física en la teoría cuántica que en la clásica? La respuesta es sí y no. Veamos por qué.

Así como el principio de Heisenberg impide definir totalmente y al mismo tiempo el valor de la velocidad y de la posición de una partícula, también impide que se puedan medir con toda precisión la energía de un proceso y el tiempo que dura. Para determinar la energía de un sistema cuantico sin incertidumbre alguna hay que emprender un proceso de medición cuya duración... ¡es infinita! Puesto al revés: la energía de un sistema puede fluctuar y esta fluctuación es menor mientras mayor sea el tiempo que dure. Fluctuaciones grandes en la energía ocurren durante tiempos muy cortos. Como en el caso del momento lineal y la posición, el producto de la incertidumbre en la energía $\Delta \boldsymbol{E}$ y en el tiempo $\Delta \boldsymbol{t}$ es del orden de la constante de Planck.

Hasta aquí el físico cuántico; pero ahora hagámoslo relativista. Él sabe que la energía y la masa son equivalentes, son dos aspectos distintos de lo mismo. Diría entonces que la fluctuación cuántica de la energía puede llegar a manifestarse como masa, puede crear otra partícula, en un proceso análogo al que observó Blackett en la creación del par electrón-positrón. Esas nuevas partículas, que surgen alrededor del sistema cuántico si hay suficiente energía, tienen vida efímera, pues sólo duran lo que la fluctuación de la energía permite. Mientras mayor sea su masa, es decir, mientras mayor sea el cambio requerido en energía del emisor, menor la vida de la partícula recién creada. Pero entonces nuestro amigo cuántico y relativista recuerda el principio básico de la teoría de la relatividad: no hay partícula que viaje con velocidad mayor que la luz. Concluye, pues, que cuanto más pesada sea la partícula de vida efímera, menor será la distancia que recorra antes de morir. Como mensajero, una partícula pesada sirve entonces sólo para distancias cortas.

Aquí hay un punto importante, en que hacemos contacto con otro principio fundamental. Sería ideal que los mensajeros del campo de fuerzas, los portadores de la interacción, fueran bosones, y no fermiones. Así, no hallarían obstáculos para entregar el mensaje, barreras que sí existirían al mediar el principio de exclusión, pues muchos estados quedarían vedados a los mensajeros.

Juntando lo anterior tenemos ya la imagen moderna de la interacción entre dos partículas elementales. Una partícula crea, por la incertidumbre de energía y tiempo, un campo de partículas efímeras a su alrededor; mientras más pesados sean estos mensajeros, menor alcance tendrán. El receptor recibe entonces al

mensajero, lo captura, y así siente la acción de la otra partícula. Distintas formas de interacción corresponden a diferentes tipos de mensajeros. Como veremos, una de las más brillantes síntesis de la física actual consiste en haber podido reducir la interacción entre partículas a sólo unas cuantas fuerzas fundamentales, o sea, al intercambio de unos pocos bosones mensajeros. Relatemos cómo ha ocurrido esto.

IX. FERMI Y LAS PARTÍCULAS NEUTRAS

NO CABE duda que el más grande físico nuclear de los treintas (y de muchas otras décadas) fue Enrico Fermi. Luego de graduarse en 1922 en Pisa y de hacer trabajo posdoctoral con Born en Alemania, Fermi fue contratado como profesor de la Universidad de Roma en 1926, en la Italia de Benito Mussolini. Ahí, en Roma, y con el auxilio de Corbino, senador, hábil político y director del Instituto de Física, Fermi estableció un grupo de investigación que en breves años —tal vez incluso meses— se convirtió en uno de los más importantes del mundo. Una mezcla rara de genio teórico, experimentador muy apto e, incluso, de hábil profesor y hombre de relaciones públicas, Fermi encontró su mina de oro con las partículas neutras. A principios de la década de los treinta, formuló su teoría de la desintegración beta bautizando, de paso, con el diminutivo italiano *neutrino* a la partícula neutra y ligera postulada antes por Pauli para evitar la violación a la ley de la conservación de la energía en el decaimiento beta. La fama del grupo de Fermi provendría, sin embargo, de sus descubrimientos con neutrones, en particular los lentos. Las publicaciones del grupo romano se suceden una a la otra, casi por semanas. Fermi asegura el crédito para su grupo publicando sus resultados en *Ricerca Scientifica*, modesta revista italiana sin árbitros que dilataran la aparición de sus artículos. Todo ello culminó en 1938, cuando se le otorgó el premio Nobel de física. Los Fermi —el mismo antifascista, y Laura, su mujer judía— viajaron directamente de Estocolmo a los Estados Unidos, convirtiéndose así en exiliados. En una cancha de squash de la Universidad de Chicago, Fermi echó a andar el primer reactor nuclear, y de ahí a la bomba atómica, sólo un paso. Pero ésta es otra historia, pues para la nuestra lo interesante es su teoría de la desintegración beta y los neutrinos; ahí aparece por primera vez en la física la que sería la cuarta interacción fundamental: la fuerza débil.

Como ya dijimos, la radiación β se conocía desde principios de siglo. De hecho, los físicos supieron de las radiaciones que emiten los núcleos antes de saber de la existencia de éstos. En la desintegración β el núcleo pasa de un estado inicial dado a otro con propiedades específicas, por lo que la energía del electrón que constituye la radiación β debería tener un valor muy bien determinado. Sin embargo, tal no es el caso. Los rayos β tienen un espectro continuo de energía, por lo que la conservación de ésta se ve en peligro. Para evitar la violación de una ley tan cara a los físicos, Pauli sugirió en 1930 que, al desintegrarse, el nucleo emitía además del electrón otra partícula, neutra y con una masa muy pequeña, si no nula. Para evitar la confusión con el neutrón de Chadwick, Fermi bautizó a esa pequeña y elusiva partícula neutra con el nombre de neutrino, el pequeño neutrón o neutroncito.

Después de asistir a la Conferencia Solvay, que tuvo lugar en Bruselas en 1933, Fermi regresó inquieto a Roma y, sólo dos meses después, escribió su artículo sobre la desintegración β. En él, inspirado en la teoría de la radiación electromagnética de Dirac, transformó la hipótesis cualitativa de Pauli en una verdadera teoría, con la cual pudo calcular muchas cosas: la relación entre la energía de desintegración y la vida media; la distribución de energías del electrón —que se creaba al tiempo de emisión, igual que los fotones en los estados atómicos excitados—; las llamadas reglas de selección, que fijaban las condiciones sobre los estados nucleares para que la desintegración β pudiera ocurrir...

Para lograr lo anterior, Fermi hubo de suponer que el neutrino era muy ligero, que tenía espín igual a $\hbar / 2$ (o sea, igual al del electrón) y que interactuaba débilmente con la materia. Además, su teoría era cuántico-relativista y, lo más importante, requería de la presencia de una nueva fuerza. A ésta, por ser más débil que la electromagnética, se le llamó la interacción débil. Todo ello resulta agradable y muy satisfactorio; sólo había una mosca en la sopa: el elusivo neutrino no se dejaba ver.[1]

Con la interacción débil se completa el cuadro de las interacciones o fuerzas fundamentales que actúan en la naturaleza. En la física clásica se reconocían ya dos de ellas: la gravitacional y la electromagnética. Los primeros años de la física nuclear forzaron a los investigadores a introducir dos nuevas interacciones: la fuerte, responsable de ligar a neutrones y protones para formar núcleos, y la débil, que causa la desintegración β del núcleo y hace que un neutrón libre no sea estable. A diferencia de las dos primeras

fuerzas, la débil y la fuerte tienen muy corto alcance, cercano al tamaño del núcleo. Por ello su influencia no es apreciable directamente en el mundo a gran escala, y ni siquiera en el nivel atómico.

Es interesante comparar la intensidad de las cuatro interacciones fundamentales. Si la fuerza electromagnética valiera 1, la nuclear sería 100 veces mayor; por su parte, la débil valdría 10^{-11} y la gravitacional tendría una acción 10^{-36} veces menor que la eléctrica. Aunque la gravitacional es tan pero tan débil, su efecto se deja sentir en nuestro mundo porque la materia es eléctricamente neutra; las consecuencias de la fuerza gravitacional, por el contrario, se suman. La acción gravitatoria es grande al tratar con masas macroscópicas, pero probablemente despreciable entre partículas tan ligeras como las llamadas elementales.

NOTAS

1 De hecho, no fue sino hasta mucho tiempo después, en 1956, cuando pudo detectarse el neutrino. Pauli vivió para ver que su conjetura era cierta, pero Fermi no, pues murió en diciembre de 1954.

Indice

X. LOS MESONES DE YUKAWA

SI OBSERVAMOS un granito de arena —cuya longitud característica sea, digamos, de un centésimo de centímétro— vemos que se comporta igual que un objeto cualquiera a nuestro alrededor. Un átomo, cuyo tamaño es diez mil veces menor al del granito, presenta ya propiedades *sui generis*. Las ondas de De Broglie para ese átomo tienen una longitud de onda comparable al tamaño del átomo mismo y los efectos cuánticos hacen su aparición. Si ahora reducimos la escala otras cien mil veces llegamos al tamaño del núcleo. No aparece, como al ir del granito de arena al átomo, una nueva física, la mecánica subcuántica, digamos. Sin embargo, el cambio de escala hace que las longitudes de onda involucradas sean tan pequeñas que el momento lineal de las partículas, y de ahí su energía cinética, crezcan mucho, hasta que la última sea del mismo orden que su energía en reposo $E = mc^2$. Las partículas elementales son, pues, rápidas y pequeñas: para tratar con ellas, la mecánica ha de ser no sólo cuántica sino relativista. Con ello se abre un nuevo mundo en la física: la teoría cuántica del campo.

La teoría cuántica del campo se aplicó primero para entender el electromagnetismo. Pauli y Dirac dieron, allá por la época de la Gran Depresión, los primeros pasos para formular la electrodinámica cuántica.

Pensemos en un problema tan simple en apariencia como dos electrones en reposo, uno frente al otro, que interactúan por la fuerza de Coulomb. ¿Qué tiene esta interacción que ver con los fotones que forman la luz, ella misma una manifestación del campo electromagnético? Ya lo hemos dicho: por la incertidumbre entre energía y tiempo, y la relación entre masa y energía, la masa del electrón fluctúa continuamente y esta partícula puede emitir fotones efímeros, que llamaremos virtuales. Mientras viven, estos fotones a su vez pueden crear pares de electrones y positrones; las nuevas partículas son capaces también de emitir otros fotones virtuales, y así *ad infinitum*. Al unir las ideas cuánticas con la relatividad vamos, inexorablemente, de una teoría que empieza con un solo electrón hacia otra con un número infinito de ellos. Mientras más partículas virtuales haya en un proceso, menor duración tiene éste y su importancia relativa disminuye. La acción conjunta de todos los procesos virtuales, en el caso electromagnético que nos ocupa, tiende entonces a un valor finito, calculable y susceptible de ser verificado. Los resultados teóricos de la electrodinámica cuántica —obtenidos por Schwinger, Feynman, Dyson y Tomonaga poco después de la segunda Guerra Mundial— , concuerdan con muchísimas mediciones experimentales y con una gran precisión. Podemos considerar, pues, que la electrodinámica cuántica es una teoría establecida y pasar a otros asuntos.

Se antoja llevar las ideas del campo cuántico a otros terrenos, por ejemplo al de las interacciones fuertes. Esto fue, precisamente, lo que hizo el físico japonés Hideki Yukawa en 1935, con lo cual aparecen en la física de partículas dos nuevos actores que serían importantes: los japoneses y los mesones.

Yukawa razonó impecablemente, con la teoría cuántica del campo en ristre y un dato experimental a la mano: la fuerza nuclear decrece abruptamente a una distancia del orden de un fermi. Si los mensajeros de esta interacción fueran partículas virtuales creadas a su alrededor: por un nucleón, y esas partículas se movieran con la velocidad de la luz, su vida sería muy efímera; sólo vivirían 10^{-23} segundos, existencia corta pero útil. Este es el valor de Δt que induciría una fluctuación $\Delta E = mc^2 = \hbar/\Delta t$ en la energía. Con estos datos, el valor de m, la masa de la partícula virtual que pudiera crearse, resulta un poco mayor que doscientas veces la masa del electrón o del positrón y cerca de una novena parte de la masa del protón o del neutrón, únicas otras partículas supuestamente elementales conocidas hacia 1935. Al usar bien las reglas del juego de la teoría cuántica de los campos, Yukawa estaba, ni más ni menos, prediciendo un nuevo tipo de partículas, cuya masa es intermedia entre la de las ligeras —positrones y electrones— y la de las pesadas —protones y neutrones—. Por su masa intermedia, habría de conocérseles como mesones.

Carl Anderson fue un gran descubridor de partículas. En 1932, con su cámara de niebla, como Ya dijimos, descubrió la antipartícula del electrón, el positrón. Tres años mas tarde, al analizar en las montañas de

Colorado los rayos cósmicos, encontró una nueva traza, menos curvada que la de un electrón pero más que la de un protón. La interpretación más sencilla de esta observación fue suponer que la traza era el recuerdo de un mesón: su masa resultó ser cerca de 200 veces la del electrón, y se le llamó el mesón μ. Estas partículas tienen carga eléctrica positiva o negativa. Las negativas decaen rápidamente dejando como herederas un electrón, un neutrino y un antineutrino, mientras que las cargadas positivamente se desintegran en un positrón y los correspondientes neutrino y antineutrino.

El júbilo de los físicos fue grande al conocer la existencia de una partícula de masa intermedia. Ello confirmaba, en apariencia, las ideas de Yukawa y ponía a la teoría cuántica y relativista sobre terreno firme. No obstante, el gozo se vino al pozo, pues pronto se mostró que esa partícula μ podía chocar libremente con los núcleos sin que éstos la atraparan. En tal condición, no podría ser un efectivo mensajero de la interacción nuclear. La partícula μ**,** no es, pues, el mesón predicho por Yukawa.

Así, y aunque no hubo que esperarlo tanto como al neutrino de Pauli, el mesón de Yukawa quedó en el limbo hasta 1947. Ese año, los físicos Lattes, Occhialini y Powell —brasileño el primero, italiano el segundo e inglés el último— encontraron en los rayos cósmicos detectados en el observatorio de Chacaltaya, en Bolivia, otra partícula de masa intermedia que sí interactuaba fuertemente con los núcleos. Así fue descubierto el mesón π o pion, como ahora se le conoce y cuya masa es cercana a 300 veces la del electrón. Yukawa y los teóricos del campo cuántico pudieron dormir tranquilos.

Poco tiempo después, cuando el ciclotrón de Berkeley entró en operación en 1948, fue posible producir piones en el laboratorio. Se les encontró cargados, π^+ y π^- se les llamó, y también neutros, los π^0 que decaen en dos fotones muy energéticos. Este último proceso muestra que el pion obedece la estadística de Bose-Einstein, lo cual también es satisfactorio: como buen portador de una fuerza, el mesón es un bosón.

¿Qué pasó mientras tanto con el mesón μ? Pues lo primero que se descubrió, en 1961, es que no es un mesón, sino más bien un electrón gordo. En todas sus características, salvo la masa, parecería una réplica pesada del electrón. Por ello ahora se le conoce como muon y ya no como mesón *m*. Dos años después, en 1963, se descubrió también que los neutrinos emitidos por el muon al decaer no eran idénticos a aquellos que acompañan al electrón en la desintegración beta. Existen, pues, dos clases de neutrinos, $\boldsymbol{v_e}$ **y** $\boldsymbol{v_m}$, que acompañan al electrón y al muon, respectivamente.

En todo caso, el zoológico subnuclear se empieza a llenar de personajes.

Indice

XI. RAYOS CÓSMICOS EN CASA

COMO vemos, muchas de las partículas descubiertas en los treintas fueron halladas en los rayos cósmicos. Estos rayos, formados por partículas de muy alta energía, provienen del espacio exterior, como su nombre mismo lo indica. De ahí que con ellos sea difícil realizar observaciones controladas, es decir, experimentos. Por eso, los físicos desde hace más de 50 años buscaron producir, acelerar controladamente y luego detectar las minúsculas partículas que forman el corazón de la materia.

Aunque el primer acelerador fue el tubo de Crookes, que empujaba electrones y que es el antecesor del cinescopio que casi todos tenemos en casa, la física de aceleradores propiamente dicha empieza en 1929 en el Cavendish Laboratory en Cambridge, Inglaterra. Allí, bajo la tutela amistosa y la mirada de tigre bueno de lord Rutherford, dos jóvenes físicos, Cockroft y Walton, consiguieron altos voltajes para acelerar protones hasta una energía de 800 000 eV. Por esas épocas, en el MIT, Van de Graaff desarrolló otro acelerador nuclear, también electrostático, que permitía obtener energías aún mayores.

Quien logró el primer acelerador electromagnético fue Lawrence, inventor del ciclotrón en 1932. Al poner las cargas dentro de un campo magnético se les fuerza a moverse en círculos; luego de cada vuelta se les da un pequeño empujón. Vuelta tras vuelta se repite el proceso, y las partículas adquieren cada vez más energía. En vez de un solo golpe fuerte, como en las máquinas electrostáticas, las partículas reciben muchos golpecitos en sucesión.

En los cuarentas, al ciclotrón sucedieron aceleradores más potentes: primero el sincrociclotrón, luego el sincrotrón, hasta llegar en 1967 a la gran máquina que acelera protones hasta 70 000 millones de electrón-voltios y que instalaron en Serpukhov los soviéticos, y en 1966 al poderoso acelerador lineal de la Universidad de Stanford. Este último tipo de acelerador tiene la ventaja de eliminar pérdidas de energía por radiación, inevitables cuando una partícula cargada da vueltas, tal y como ocurre en los aceleradores circulares. Para reducir esas pérdidas, éstos últimos deben tener radios cada vez más grandes, que ya llegan a muchísimos metros en la actualidad.

En los últimos tiempos la empresa de acelerar partículas se ha convertido en monumental e incluso para países dispuestos a invertir cantidades astronómicas (cada vez más) de pesos, como la Unión Soviética y los Estados Unidos, es muy gravosa. Por ello se han formado consorcios internacionales para diseñar, construir y operar los grandes aceleradores de protones y electrones. La primera —y hasta ahora la más exitosa— de estas asociaciones internacionales fue el Consejo Europeo para la Investigación Nuclear (CERN, por sus siglas en francés), cuya sede está en Ginebra y donde muchos descubrimientos importantes para la física de partículas se han hecho.

Más adelante, a lo largo de nuestra historia, describiremos brevemente lo que son los aceleradores más potentes hoy y lo que podrían ser las máquinas de las generaciones futuras. Por el momento, retomemos el relato de la vida en familia de las partículas elementales.

Indice

XII. LEPTONES PESADOS

HASTA ahora hemos mencionado las siguientes partículas, que bien podrían ser elementales y, por tanto, buenos candidatos para reemplazar al verdadero átomo de los griegos. En orden ascendente de la masa, tenemos en primer lugar a los neutrinos. Los de un tipo, ν_e, acompañan al electrón, pero hay otros, como el $\nu\mu$, que surge al desintegrarse el muon o el pion. Este último es muy parecido al electrón, aunque pesa más que él. Estas cuatro partículas se agrupan en una familia que, por ligera, llamaremos leptónica —del griego *leptos,* ligero—.

Otra familia, cuyos primeros miembros ya conocimos, es la de los mesones, o partículas de masa intermedia. Aquí tenemos tres miembros, los piones π^+, $\pi 0$ y π^-. Por otro lado, ya encontramos al protón y al neutrón, los nucleones o constituyentes del núcleo atómico. Éstos son los dos primeros miembros de la tercera familia, la de los bariones —del griego *barios,* pesado—. Su masa es 2000 veces la del electrón y varias veces la del pion. Finalmente, tenemos al fotón o cuanto de luz; pero éste no es una partícula, es tan sólo energía, y forma por sí mismo una clase con un solo miembro. A diferencia de las otras partículas que hemos mencionado, el fotón es su propia antipartícula. En casi todos los otros casos, sin embargo, la antipartícula existe y es diferente a la correspondiente partícula. El antineutrino mismo existe, lo que hace sospechar que si bien es muy ligero, tiene masa.

En los últimos treinta años, centenares de físicos armados con sus poderosas máquinas han descubierto muchos nuevos miembros de estas familias. Relataremos tales historias de familia sin seguir el orden cronológico. Más bien, trataremos a cada familia por separado, contando vida, milagros y hasta muerte de sus nuevos miembros, siempre buscando esclarecer con cuidado su linaje y parentesco. Veamos qué ocurrió con los leptones.

En 1972 se echó a andar en Stanford, California, una nueva máquina, de nombre atractivo: SPEAR (que significa lanza). Este aparato es uno de esos que se conocen como anillos de almacenamiento. En estas máquinas se hacen girar en sentido contrario dos haces, uno formado por electrones y el otro por positrones. Los haces de materia y antimateria se entrecruzan y a veces las partículas se encuentran con sus antipartículas; con ello se aniquilan y se produce una cantidad enorme de energía. Esta última, a su vez, puede manifestarse como masa, es decir, diversas partículas con muy diferentes propiedades pueden crearse.

Dos años después de la instalación de SPEAR, un grupo de físicos norteamericanos, dirigido por Martin Perl, observó 200 eventos en que se generaban simultáneamente un electrón y un muon (o sus antipartículas). Como Peri y sus colaboradores sabían detrás de qué andaban, pronto pudieron corroborar que habían encontrado un nuevo leptón, cuya masa era cercana al doble de la del protón. Resultaría entonces que existen los leptones pesados, nombre contradictorio si es que los hay.

¿Cómo se hace para hallar una nueva partícula? Primero, se deberá tener una idea clara de lo que se busca; en segundo lugar, se deberá encontrar un método para construir la partícula en cantidades apreciables, y finalmente, han de saberse las señas particulares del nuevo objeto. Estas tres reglas —simples de escribir, difíciles de seguir— fueron escrupulosamente obedecidas por el grupo de Stanford.

La familia de leptones hasta 1974 tenía ocho miembros, como ya dijimos: el electrón y el muon, el neutrino electrónico y el muónico, además de sus correspondientes antipartículas. El electrón es estable por la simple razón de que no hay otra partícula más ligera a la que pueda decaer. El muon, por su parte, sí se descompone, aunque no lo hace electromagnéticamente, lo que sería más expedito. A pesar de que este electrón gordo tendría la suficiente energía para crear fotones y electrones, prefiere no seguir este camino. En vez de ello, decae a causa de la interacción débil y produce un electrón, un neutrino muónico y un antineutrino electrónico. Todo ocurre como si hubiera alguna regla misteriosa que la naturaleza no quisiera violar. Esa regla se expresa al decir que el número de leptones tipo electrónico o de leptones tipo muónico

se conserva, es decir, que vale lo mismo antes y después de que el proceso ocurra. Al electrón y al neutrino les asociamos un número leptónico de carácter electrónico igual a **+1,** y a sus correspondientes antipartículas un numero leptónico igual a **-1.** Lo mismo hacemos con μ y ***v***μ, y les asignamos un número leptónico de carácter muónico. Con ello, la contabilidad es simple, y no es difícil prever cuáles procesos ocurren y cuáles están prohibidos.

Empero, el misterio de los leptones, en particular el del muon, queda allí. ¿Qué cosa rara, se preguntan los físicos, es un muon? Si ya tenemos un electrón pesado que rehúye las interacciones fuertes, ¿habrá otro incluso más gordo y, por tanto, existirá toda una serie de leptones, cuyos primeros miembros sean el electrón *y* μ? Supongamos, dijeron Perl y sus colaboradores, que así sea. Busquemos, pues, el tercer miembro cargado eléctricamente de la familia de los leptones. Si ha de existir, llamémosle τ, porque esta letra es la primera del griego *tritos*, que significa tercero. Pero nunca perdamos de vista nuestras reglas de conducta, y preguntémonos qué señas particulares dejaría ese supuesto tauón.

Primero se supuso que τ llevaría su propio número leptónico, ahora de carácter tautónico. Entonces, la tau se desintegraría también a causa de la interacción débil; aunque puede hacerlo al menos de dos modos: produciría un neutrino tipo *t* , un muon y un antineutrino muónico, o bien un electrón y un antineutrino electrónico así como un neutrino tipo τ ; se tienen, desde luego, los correspondientes procesos para la antitau. Vamos por buen camino, pues en la colisión electrón-positrón esperamos generar un par tau-antitau; en tal caso, veríamos al final un electrón y un muon (o sus antipartículas). La presencia simultánea de ***e*** y μ sería la huella de tau; a buscarla debe dirigirse el experimento.

En 1974 se encontraron veinte sucesos como los descritos; la masa del tauón sería cercana a veinte veces la masa del muon. Dos años después ya se había detectado la huella de τ más de 200 veces. Un grupo alemán, con su anillo de almacenamiento DORIS, repitió luego el experimento y confirmó la existencia de *t*, el tercer miembro de la familia que dejó de ser ligera.

Vemos que la clasificación de las llamadas partículas elementales por su masa no es buena. Una taxonomía mejor se logra caracterizándolas por las interacciones que sufren. Así, ahora decimos que los leptones son aquellos que pueden interactuar electromagnética y débilmente, pero que son insensibles a la interacción fuerte.

Después de todo ello, la familia de los leptones tiene seis miembros (y sus correspondientes antimiembros): el electrón, μ, τ y sus respectivos neutrinos.[1] Los tres primeros están cargados, y en consecuencia sienten la interacción electromagnética. Por otro lado, y esto es crucial para nuestra historia, no ha habido indicio alguno de que estos leptones tengan estructura, es decir, de que no sean elementales. Los leptones son objetos puntuales, son realmente indivisibles. En tal sentido, forman parte de esa familia de "átomos verdaderos" que hemos perseguido a lo largo de nuestro relato.

Sin embargo, los leptones no son los únicos verdaderamente elementales. Los físicos de finales de los ochentas creen que existen otras partículas también elementales: los cuarks. Veamos ahora su historia.

NOTAS

1 En el anillo de colisiones que está en Hamburgo, y que se llama PETRA, se ha demostrado que no existen otros leptones con masa entre la de τ y 10 veces ésta.

XIII. LA HISTORIA SE REPITE

A PRINCIPIOS de siglo, Rutherford lanzó partículas a contra láminas de metal formadas por átomos. Llegó a la conclusión de que el átomo era un sistema compuesto, con un núcleo masivo en el centro y electrones a su alrededor. Los físicos de Stanford, con su acelerador lineal SLAC, mostraron, con un experimento en esencia igual al de Rutherford, que a una escala 100 000 veces menor que la atómica la historia se repite: los nucleones también tienen una complicada estructura interna. Protón y neutrón no son, en consecuencia, partículas verdaderamente elementales.

La diferencia entre las experiencias de Rutherford y los experimentos de Stanford se puede ver fácilmente si usamos, una vez más, el principio de incertidumbre de Heisenberg. Con el SLAC queremos ver distancias del orden de un fermi, $\mathbf{10^{-13}}$ **cm**. El "microscopio" necesario debe usar una radiación con la longitud de onda apropiada para esta escala. Si se aceleran electrones, como en este acelerador, el momento lineal que corresponde a $\hbar/\lambda$ **y** $\lambda \approx \mathbf{1}$ fermi implica una energía para esos proyectiles que es del orden de los mil millones de electrón-voltios. Esta es ahora la unidad pertinente de energía, y le llamamos giga-electrón-voltio, GeV por brevedad. Con el super microscopio electrónico SLAC podemos "ver" lo que ocurre dentro de un protón. En particular, es posible averiguar si esta partícula tiene algo dentro, o si es puntual y en consecuencia verdaderamente elemental. Hay sorpresas en puerta.

Resulta cómodo, por varias razones, usar electrones para analizar protones. Primero, y hasta donde sabemos, el electrón es una partícula puntual. En segundo lugar, nucleones y electrones interactúan por medio de las fuerzas electromagnética y débil, pero no a través de la fuerte. Es más, la fuerza débil es tan débil si se compara con la electromagnética, que ésta última es la única que rige la colisión de un electrón muy veloz con el blanco de protones. Pero entonces vamos por buen camino, pues el electromagnetismo es el único dominio de la física en que nos movemos con pie seguro. La electrodinámica cuántica (y cuando la situación física así lo permite, su límite clásico) ha mostrado su validez aun cuantitativa en cuanto experimento se la ha probado, desde distancias cósmicas hasta $\mathbf{10^{-15}}$ centímetros. Puesto en otros términos: podemos suponer que conocemos bien cómo se comporta un experimento con electrones de alta energía.

Los resultados de los experimentos de Stanford y otros semejantes llevados a cabo en Europa son tan interesantes, o acaso más, que los que obtuvo Rutherford. ¡El protón y el neutrón no son elementales! Es más, los experimentos pueden entenderse si se supone que el electrón de altísima energía detecta un conjunto de partículas verdaderamente puntuales que se mueven libremente dentro, del protón. El físico norteamericano Richard Feynman, uno de los creadores de la electrodinámica cuántica, llamó partones a esas masas puntuales constituyentes del nucleón. ¿Serán estos partones otros verdaderos átomos, que junto con los leptones sean realmente elementales?

Antes de intentar la respuesta que hoy se da a esta pregunta en la teoría moderna —la cromodinámica cuántica—, veamos algo más sobre la familia bariónica. Entre 1950 y 1960 se descubrió una gran multitud de miembros de esta familia, todos más pesados que el protón. El primer miembro de este grupo fue descubierto en 1952 con el entonces nuevo ciclotrón de la Universidad de Chicago. El proyecto, dirigido por Enrico Fermi, buscaba entender mejor a los piones. Haciendo chocar protones con nucleones se producían mesones π^+, que luego formaban un haz secundario de energía bien definida. Con ellos se podían hacer experimentos en que choca un pion contra un neutrón o contra un protón. El grupo de Fermi descubrió que la colisión entre el pion y el nucleón mostraba una peculiaridad a unos 300 MeV (es decir, a 300 millones de eV) de energía del mesón. Se le llamó la resonancia 3-3 y hoy se le conoce como la partícula Δ.

Hacia 1957, en los libros de texto era común que se mencionaran siete bariones, cuyas masas en MeV eran las siguientes:

TABLA 1.

Símbolo	*Masa (Mev)*	*Vida media (seg)*
p	**938**	∞
n	**939**	**1050**
Λ^0	**1115**	**2.9×10^{-10}**
Σ^0	**1189**	**$< 10^{-11}$**
Σ^+	**1190**	**$.7 \times 10^{-10}$**
Σ^-	**1197**	**1.6×10^{-10}**
Ξ^-	**1321**	**$< 5 \times^{-10}$**
Ξ^0	**?**	**?**

A las partículas Λ, Σ y Ξ, por ser más pesadas que el neutrón, se les llamó hiperones. Como se ve en la tabla, el protón *(p)* y el neutrón *(n)* tienen casi la misma masa; lo mismo es cierto para las partículas sigma. A estas coincidencias en la masa de las partículas los espectroscopistas les llaman, respectivamente, un doblete y un triplete. Notese que en 1957 se creía en la existencia del hiperón Ξ^0, la cascada neutra, aunque no se le había detectado. Otro hecho interesante que debemos notar en la tabla es la vida media de los hiperones: es siempre del orden de 10^{-10} seg, un tiempo pequeño si se mide en segundos, ¡pero increiblemente largo si se mide en las unidades de tiempo apropiadas para la interacción fuerte, tiempo que es del orden de 10^{-23} segundos!

En efecto, la longitud típica que ocupan los nucleones e hiperones es 1 fermi, o sea 10^{-13} cm. Si una partícula cruza esta distancia a una velocidad cercana a la de luz, es decir 3×10^{10} cm/seg, tarda menos de 10^{-23} seg en hacerlo. Éste es el tiempo característico que toman las interacciones fuertes. Medido en estas unidades, 10^{-10} seg representa una vida media larguísima. La mecánica cuántica nos da la explicación de este retraso temporal que permite la existencia de esas partículas: la onda que acompaña a la partícula submicroscópica se queda atrapada. Existen, pues, resonancias como las que hacen persistir al sonido en una guitarra o como aquellas que causaron los daños en la Ciudad de México en el sismo del 19 de septiembre de 1985. Aquí, al igual que en los bariones, las ondas sísmicas no pudieron abandonar el lecho profundo y arcilloso del lago de Tenochtitlan. El temblor, en el centro de la capital mexicana, tuvo una duración dos o tres veces mayor que en la vecindad del epicentro, en el Océano Pacífico. Igual ocurre con los bariones y por eso les llaman resonancias.

¿Quién jugó el papel del lago de Tenochtitlan en el caso de los bariones? ¿Qué mecanismo impidió la desintegración de esas resonancias? En otros términos, ¿por qué no pudo actuar la fuerza nuclear? La respuesta es por demás interesante y nos ocuparemos de ella en un instante; pero antes, regresemos a la primera observación que hicimos sobre la tabla de los bariones: varias de las resonancias tienen una masa semejante.

Cuando se midieron las propiedades del neutrón, su parentesco con el protón fue evidente. Sus masas coinciden hasta el 99.9% y su espín es el mismo, pero difieren en que el protón lleva carga eléctrica y el neutrón no; asimismo, este último decae por efecto de la interacción débil cuando está libre. Lo anterior se puede explicar si se supone *grosso modo* que la energía de estos nucleones se debe a la interacción fuerte, mientras que las pequeñas diferencias en masa son de origen electromagnético. Como esta última fuerza es 100 veces menor que la fuerza nuclear, podemos entender los datos experimentales que caracterizan a los nucleones. Nótese claramente que si sólo existiera la fuerza nuclear, protón y neutrón serían idénticos.

La segunda espectroscopía, la nuclear, nos permite poner a prueba esta última afirmación contundente: la fuerza nuclear no distingue entre un protón y un neutrón. Si analizamos el espectro de energías de dos núcleos, uno con *Z* protones y *N* neutrones, y el otro con *N* protones y *Z* neutrones, el experimento no debería distinguir, de manera burda, uno del otro. Tenemos en la naturaleza muchas de estas parejas,

llamadas núcleos espejo: litio 7 y berilio 7, o boro 11 y carbono 11, por ejemplo. Comprobamos, en efecto, la gran semejanza de los espectros y de ahí que la interacción fuerte sea insensible al valor de $T_3 = (Z - N)/2$, cantidad que se conoce técnicamente como "tercera componente del espín isotópico". Para nuestros propósitos, bástenos saber que la carga eléctrica *Q* de los nucleones puede escribirse como

$$Q = T_3 + A/2,$$

donde ***A*** es el número de masa bariónico, que vale 1 para los nucleones y los hiperones, y 0 para los piones y otros mesones. Con este nuevo concepto cuántico, el espín isotópico, caracterizamos a los multipletes de resonancias, que tienen casi igual masa pero diferente carga eléctrica. Puesto de otra manera: la interacción fuerte respeta al espín isotópico, no puede cambiar su valor.

Ahora podemos regresar a la discusión de la gran vida media de los hiperones Λ, Σ, etc. Estas partículas tienen otra propiedad extraña, que también es respetada por la fuerza nuclear. Es decir, ningún proceso causado por la interacción fuerte puede cambiar el valor de esta propiedad. Por extraña, se le dio el nombre de extrañeza y el símbolo *S* (de la inicial de la palabra inglesa *strange*). Para partículas extrañas la relación anterior ha de generalizarse, que fue exactamente lo que hicieron el físico americano Murray Gell-Mann y el investigador japonés Kazuhiko Nishijima, al proponer lo que hoy se llama la ley Gell-Mann-Nishijima:

$$Q = T_3 + A/2 + S/2.$$

Para el protón, el neutrón y π, *S* vale cero: éstas no son partículas extrañas. Cuando $S = -1$, sin embargo, $A = 1$, $T_3 = 0$, la fórmula corresponde a un solo barión neutro, que bien puede ser la resonancia Λ_0 de la tabla; con $A = 1$, $T_3 = 0, +1, -1$, nos da el triplete Σ^+, Σ^- y Σ^0. Por su lado, $S = -2$, $A = 1$, $T_3 = +1/2$, podrían representar al hiperón Ξ^- y a su compañero Ξ^0. [1] También podemos tener resonancias con ***S*** positiva, igual a **+1**, por ejemplo.

La extrañeza no surge de la nada. Poco después de que se descubrió el mesón π, algo raro llamado la partícula ***V*** se vio en los rayos cósmicos. En la cámara de niebla, esta partícula dejaba una traza como la letra ***V***, de ahí su nombre. La masa de esta partícula era mayor que la del pion. Estas partículas *V* no se ven con frecuencia, por lo que la probabilidad de hallar dos de ellas debería ser pequeñísima. Sin embargo, a menudo se ven en parejas y, además, una de ellas decae luego en un protón. En otras palabras, al chocar los rayos cósmicos de alta energía con la materia se da la producción asociada de un mesón y de un hiperón, que vienen siempre por parejas. Estas partículas deberán ser extrañas, una con $S = +1$, y otra con $S = -1$, de tal manera que el estado final no tenga extrañeza. Existen, pues, los mesones extraños: con $S = 1$, $A = 0$ y $T_3 = +1/2$, por ejemplo, formaríamos lo que ahora se conoce como el doblete extraño formado por K^+ y K^0 , que son los mesones hoy llamados kaones, de masa cercana a 500 MeV, y que originalmente se detectaron como partículas ***V*** en los rayos cósmicos.

Con todo lo anterior, las familias de bariones y mesones crecieron mucho: en vez de los 30 miembros conocidos en 1957, en 1964 podíamos reconocer 80 o más resonancias con masa inferior a 2000 MeV y número de masa $A = 1, 0, -1$. Tenemos pues tantos, o incluso más, bariones y mesones que elementos químicos había en la tabla periodica de Mendeleyev.

Es claro que con una proliferación tal de partículas "elementales" ya no es posible darles este epíteto. Si añadimos, además, lo que ya sabemos sobre el protón cuando lo analizamos con un electrón de alta energía, vemos que los bariones y los mesones no son partículas elementales. La historia se repite y el átomo de los griegos nos elude una vez más.

NOTAS

[1] Ya que los físicos crean en la ley Gell-Mann-Nishijima, presentaban en la tabla de hiperones que antes

mostramos, y que se acostumbraba en 1957, con un signo de interrogación a la resonacia Ξ^0, aun cuando no había sido descubierta; ahora ya se ha detectado.

Indice

XIV. ¡POR FIN, LOS CUARKS!

EN NUESTRA búsqueda del verdadero átomo, aquella partícula indivisible que sea realmente elemental, nos hemos adentrado en los vericuetos de la materia. Hallamos primero átomos y moléculas; después encontramos que el átomo no era elemental, sino formado por electrones que circundan a un núcleo; este último, a su vez, no resultó indivisible: lo forman protones y neutrones; por su parte, los nucleones tampoco resistieron nuestro ataque, y con potentes microscopios electrónicos vimos que también tenían partes.

Con sus poderosos aceleradores, los físicos descubrieron en unos cuantos años decenas de partículas que pueblan el mundo submicroscópico. Como ya dijimos, las agruparon en tres familias, leptones, mesones y bariones. Esta clasificación, que en principio obedecía a la masa de las partículas elementales, no es buena. Así, existe el leptón tau, que es más pesado que muchos bariones, y varios de éstos tienen una masa menor que algunos mesones. Además, los bariones y mesones no pueden ser elementales, pues hay tantos de ellos que incluso superan en número a los elementos de la tabla periódica de Mendeleyev.

Por ello los físicos pensaron en otra clasificación de las así llamadas partículas elementales. En vez de usar como criterio taxonómico a la masa, las dividieron en dos grandes grupos: aquellas partículas (o resonancias) no sujetas a la interacción fuerte y otras que sí se ven afectadas por ella. Las primeras coinciden, curiosamente, con la familia de los leptones y las del segundo tipo se conocen como hadrones (del griego *hadros,* fuerte), entre ellos los nucleones (*p* y *n*)y los mesones.

Ya hemos descrito a los leptones que son, en apariencia, verdaderamente elementales. Por más que se han buscado, no existen indicios de que el electrón, el muon o la partícula tau tengan partes. Hasta donde hemos podido analizarlas, son partículas puntuales, todas ellas con carga -*e* y un espín igual a $\hbar/2$, es decir, son todas ellas fermiones. Junto con el electrón, la μ y la tau aparecen los correspondientes neutrinos, el electrónico $\boldsymbol{v_e}$, el muónico $\boldsymbol{v}_\mu$ y el tauónico $\boldsymbol{v}_\tau$. Como su nombre lo indica, estas partículas son neutras. Al igual que los otros leptones, los neutrinos tienen espín $\hbar/2$ y obedecen también la estadística de Fermi. Su masa, por otro lado, es casi nula.

La familia de los leptones —que en total tiene doce miembros— se completa con las antipartículas: antielectrón (o positrón), antimuón y antitau, todas ellas cargadas positivamente, así como con los tres antineutrinos, que no llevan carga. Cuando interactúan, los leptones se comportan de manera diferente de acuerdo al grupo a que pertenecen, cada uno asociado a un número leptónico. Así, por ejemplo,el electrón y $\boldsymbol{v_e}$ tienen número electrónico 1 y sus números muónico y tauónico son cero. A los antileptones se asignan números leptónicos de signo contrario. Estos números leptónicos se conservan en todas las reacciones, aun cuando un leptón decaiga en otro. Por ejemplo, μ decae con una vida media de 2.2 microsegundos formando un electrón, un $\boldsymbol{v}\mu$ y un antineutrino del tipo electrónico; antes y después del decaimiento, el sistema tiene números leptónicos **0**, **1** y **0** para los grupos *e*, μ y τ de la familia.

La situación con los leptones no deja de ser paradójica. Por un lado, y como ya hemos mencionado varias veces, no nos han permitido ver hasta ahora su estructura: por más experimentos que se han hecho, el electrón, por ejemplo, siempre aparenta ser elemental. Por otro lado, μ y τ no son estables y podrían no ser elementales. La existencia misma de los leptones pesados sigue siendo un gran misterio.

Con la otra familia de partículas elementales, los hadrones, la naturaleza ha sido menos recatada. Además del protón, el neutrón y los mesones existe una multitud de hadrones, que son muy masivos y efímeros. Haciendo chocar violentamente electrones con positrones o bien protones con antiprotones, los investigadores han descubierto con sus potentes aceleradores muchas decenas de hadrones y les han medido su masa y su espín, su carga y su extrañeza. Por todo ello, resulta evidente que los hadrones son

partículas compuestas, y no realmente elementales.

Así aparece en la escena física quien seguramente habrá ser considerado el Mendeleyev del siglo XX: Murray Gell-Mann. Hijo de un inmigrante austriaco, Gell-Mann nació en Nueva York, el quince de septiembre del año en que comienza la Gran Depresión. Se doctoró en el MIT, trabajó luego con Fermi en Chicago y finalmente se estableció en el Instituto de Tecnología de California donde, en 1958, cuando aún no había cumplido los 27 años, fue nombrado profesor. Entre sus muchas contribuciones a la física de frontera, tenemos la introducción del concepto de extrañeza y la fórmula Gell-Mann-Nishijima, que ya mencionamos; además originó la teoría ***V - A*** de las interacciones débiles, el modelo del octete, el álgebra de corrientes y la idea del cuark. Aparte de ser un físico famoso, Gell-Mann es un experto aficionado a la lingüística, dado a incorporar términos a la nomenclatura de la física; a él se deben nombres como el de extrañeza, y los de cuark y color que veremos a continuación.

Un aforismo atribuido a Buda sugirió en 1961 a Gell-Mann la vía del octete para entender la existencia de supermultipletes, que ya no de multipletes, entre los hadrones. Al usar la técnica matemática conocida como teoría de los grupos, Gell-Mann (y al mismo tiempo el físico, militar y político israelí Yuval Ne'eman) sugirieron que el hecho de que muchos bariones y mesones tuvieran masas casi iguales entre sí indicaba la presencia de una simetría más profunda en la naturaleza. Esta es la llamada simetría ***SU*(3)**, que es el nombre del grupo matemático de transformaciones unitarias de 3 dimensiones. Con la teoría ***SU* (3)** podían predecirse las masas y otras propiedades de algunos mesones y bariones no conocidos hasta entonces.

Cuando proliferaron los hiperones se vio claro que podrían agruparse de acuerdo a su masa y otras propiedades. Ejemplo de ello es la tabla 1 que mostramos ya en el capítulo anterior, la que con Ξ^0 forma un supermultiplete de ocho elementos, un octete. Otro ejemplo, vigente antes de 1964, es el grupo formado por nueve resonancias, entre las que se encuentra la partícula delta hallada por Fermi en 1952. Si se acepta un orden, como el impuesto en la simetría ***SU(3)***, estos supermultipletes no son arbitrarios; por ejemplo, puede haberlos de 1, de 8, ó de 10 miembros, pero ningún supermultiplete consiste, digamos, de nueve resonancias. Por tanto, al usar la teoría de grupos, podemos asegurar que ese grupo de nueve resonancias está incompleto, como también lo estaba la tabla de hiperones del capítulo anterior antes del descubrimiento de la partícula Ξ^0 hoy llamada cascada. Al grupo de nueve resonancias le falta también un miembro, que Gell-Mann llamó Ω^-. Con las herramientas matemáticas del grupo **SU(3)** podemos predecir no sólo la masa de omega menos, sino también su espín, su espín isotópico y su extrañeza que vale ***S* = -3**. si Ω^- existiera, se satisfarían los requisitos impuestos por la simetría y el orden en el mundo subnuclear.

Aunque Gell-Mann apenas había cumplido los treinta años cuando predijo la Ω^-, ya era un físico teórico de fama bien ganada. Por ello, sus elucubraciones fueron vistas con atención y todo un ejército de físicos e ingenieros del Laboratorio de Brookhaven, en Nueva York, se lanzó a la aventura de buscar la omega menos. Para ello contaban con su recién construida cámara de burbujas, enorme dispositivo de acero inoxidable lleno de hidrógeno líquido. El hidrógeno está superenfriado y se mantiene a presión para evitar que hierva. Entonces, cuando una partícula subnuclear cruza el recipiente, ioniza unas cuantas moléculas y alrededor de estos iones se pueden formar burbujas. Esa estela de burbujas nos deja "ver" a la partícula que entró a la cámara y determinar sus propiedades. El grupo de Brookhaven, dirigido por Nicholas Samios, analizó más de trescientas mil fotografías de procesos en que intervenían partículas con extrañeza diferente de cero. Finalmente, en la expansión número 97 025 de la cámara de burbujas, los investigadores encontraron la huella de omega menos.

El descubrimiento experimental del mesón η en 1962 y del barión omega menos en 1964 —ambas resonancias predichas por la vía del octete— reforzó enormemente las ideas de la teoría ***SU*(3)** y dejó abierto el camino al modelo de los cuarks. En más de un sentido, la historia se repitió: hace más de cien años, Mendeleyev predijo la existencia del galio, del germanio y del escandio, así como sus propiedades químicas, basado sólo en su fe en las simetrías de la tabla atómica. Con esa misma fe en la simetría ***SU*(3)**, la simetría de la tabla hadrónica, Gell-Mann predijo cómo deberían ser los mesones y bariones faltantes.

Al descubrirse los elementos químicos predichos, Mendeleyev se convirtió en el químico más famoso del mundo y su tabla periódica de los elementos adquirió carta de naturalización en la ciencia. Igual ocurrió con Gell-Mann y el modelo de los cuarks un siglo más tarde.

La matemática detrás del modelo ***SU*(3)** sugiere que los hadrones no son elementales, sino formados por entes aún más básicos. Estos nuevos entes, los cuarks, serían, ahora sí, elementales. Algunos experimentos, como los ya mencionados en que se bombardean nucleones con electrones de muy alta energía, indican que dentro del protón hay tres cuarks; en la misma forma, un mesón estaría formado por la unión de un cuark *q* y un anticuark, que denotaremos como $\bar{q}$.

En su versión original, el modelo de cuarks supuso la existencia de tres de ellos: el cuark ***u***, el ***d*** y el ***s***, así como sus correspondientes anticuarks. Todos ellos son fermiones, con espín $\hbar/2$, igual que los leptones. Los cuarks ***u*** y ***d*** tienen extrañeza nula, pero para el cuark *s* este número cuántico vale -1. Con ello se pueden generar partículas compuestas que sean extrañas o partículas cuya extrañeza valga cero. Según el principio de exclusión de Pauli, con tres fermiones construiríamos otro fermión: así se obtienen los bariones, todos ellos con espín semientero. En cambio, para formar los mesones, que son bosones, se requiere un número par de cuarks. En realidad los mesones son la moneda con que se intercambia la energía en el mundo subnuclear. Los mesones son cuantos de energía que pueden emitirse y absorberse libremente. Por ello, en el modelo de cuarks se supone que están formados por la unión de un cuark y un anticuark. Esta pareja partícula-antipartícula puede aniquilarse, convertirse así en energía y ser el emisario de la interacción.

Con los tres cuarks ***u***, ***d*** y ***s*** se podían explicar *grosso modo* casi todos los hechos conocidos, a mediados de los sesentas, para los bariones. Lo anterior es cierto a condición de que se hicieran algunas suposiciones raras. En primer lugar, la carga de los cuarks no sería un múltiplo entero (positivo o negativo) de la carga del electrón. En efecto, es necesario suponer que el cuark ***u*** lleva una carga igual a **(2/3)*e***, y que los cuarks ***d*** y ***s*** tienen carga negativa igual a **(-1/3)*e***. * La condición es rara, pues hasta entonces todo ente subnuclear se nos había aparecido con cargas múltiplos del electrón. Por otro lado, el hecho de tener cargas fraccionarias haría al cuark muy conspicuo. Con ello en mente se diseñaron los experimentos para encontrar al cuark libre.

Como ya dijimos, McCusker y su grupo de físicos australianos buscaron, en miles de fotografías tomadas en una cámara de niebla, una traza anómala. Basaban su búsqueda en la propiedad del cuark que arriba mencionamos. Como el ancho de la traza dejada en la niebla es proporcional al cuadrado de la carga eléctrica de la partícula que cruza la cámara, el ancho de la traza dejada por un cuark *u* sería tan sólo $(2/3)^2 = 4/9$ de la que dejan otras partículas, y la de los cuarks *d* y *s* sería todavía más delgada: apenas llegaría esa traza a tener el 10% del ancho de una traza normal. No ha de extrañarnos, entonces, el gran alboroto que causaron los australianos al anunciar que habían detectado trazas delgadas, como las que produciría un cuark. Sin duda, ese descubrimiento hubiera sido tan importante como lo fue el del electrón, setenta años antes. Sin embargo, y tal como relatamos al principio de esta historia, el hallazgo de McCusker fue desechado, atribuido a fallas de calibración en el aparato y a otros errores experimentales.

A mediados de la década de los setentas, el *American Institute of Physics*, empresa que edita las principales revistas americanas de física, decidió cambiar algunas de sus políticas editoriales. Entre las nuevas ideas se hallaba la siguiente: si por alguna circunstancia un centro de investigación consideraba que un trabajo producido en él era de la suficiente importancia como para evitar dilaciones en su publicación, el responsable del centro podría solicitar la exención del arbitraje del artículo correspondiente. Eso fue lo que ocurrió con un trabajo de los físicos experimentales de la Universidad de Stanford, William Fairbank y sus colegas, en 1977. En él mencionan haber encontrado granitos superconductores con carga fraccionaria, que bien podrían delatar al cuark. Otra vez, como en casos anteriores, las conclusiones de Fairbank y sus colaboradores no fueron aceptadas.

El resultado de todos los experimentos hechos hasta ahora parece ser ineludible: no es posible hallar un cuark libre.

La situación se agrava para el modelo de cuarks cuando nos ponemos más exigentes con él y deseamos obtener, de la manera más refinada posible, las propiedades de todos los hadrones. Queremos repetir con los cuarks y los hadrones la historia del núcleo y de la segunda espectroscopía. En ésta, jugando con neutrones y protones que interactúan, se busca explicar las propiedades de los núcleos complejos, como el oxígeno, el fierro o el uranio. En la física de los cuarks, la tercera espectroscopía, se buscan las resonancias bariónicas, sus masas y sus propiedades, como consecuencia de la dinámica de tres cuarks que interactúan. Pronto llegamos a un callejón sin salida, pues los cuarks aparentan violar el sacrosanto —para la física moderna— principio de Pauli.

NOTAS

* Así, el protón sería la tríada ***uud***, con carga **+2/3 + 2/3 - 1/3 = +1**, y el neutrón estaría formado por dos cuarks ***d*** y uno ***u***; por su parte, el barión Λ, cuya extrañeza es -1 y cuya carga es cero, correspondería a la tripleta *uds*. También en el modelo de cuarks, un pion positivo se compone de un cuark ***u*** y un anticuark $\bar{d}$, por lo que se denota $u\bar{d}$, y su carga vale **+2/3 - (-1/3) = +1**; análogamente, el mesón neutro ***K***°, que es una partícula extrana, sería $d\bar{s}$, con carga cero y extrañeza **+1**.

Indice

XV. EL MODELO DE CUARKS EVOLUCIONA

PARA formar la partícula Ω^-, aquella cuyo descubrimiento reforzó la teoría ***SU*(3)** y abrió la puerta de la física a los cuarks, se requieren tres cuarks s que ocupen el mismo estado. Esta afirmación tan simple causó una verdadera conmoción en la física de los cuarks. Por un lado, es necesario que tengan espín semientero y se comporten como fermiones; por el otro, parecen ocupar los mismos estados, como sólo pueden hacerlo los bosones. El teorema de Pauli, una de las columnas básicas de la mecánica cuántica y relativista, pone en entredicho al modelo original de los cuarks. Si a esto agregamos que el cuark libre no se ha observado, parecería que todos los caminos de salvación del cuark se hubieran agotado y los físicos deberían investigar por otras vías. Sin embargo, no ha sido así; los físicos se han empecinado y el derrotero de su ciencia sigue hasta el presente unido al de los cuarks.

Ante la disyuntiva de eliminar un principio fundamental como el de Pauli, que liga espín y estadística, o de dar por concluido un modelo particular, como el de los cuarks, lo primero que intentan los científicos es claro: hacen prevalecer el principio general. Si queremos mantener el modelo particular, éste ha de evolucionar. Ello fue precisamente lo que ocurrió con los cuarks.

Para percatamos de cómo se generó esta evolución del modelo de los cuarks, pensemos por un momento en lo que hubiera ocurrido si Pauli, ya poseedor de su principio de exclusión, hubiera analizado los espectros atómicos sin conocer el espín del electrón. Regresemos, pues, por un instante a la primera espectroscopía, la atómica. Evidencias tan conspicuas como la de los gases nobles o inertes hubieran representado una violación al principio de exclusión. Para explicar su poca afinidad a mezclarse con otros átomos y su gran estabilidad energética, es necesario, por ejemplo en el caso del helio, que los dos electrones ocupen el mismo estado cuántico. Lo mismo podría decirse de las regularidades en la tabla periódica de Mendeleyev. Para dejar a salvo el principio de exclusión, Pauli probablemente hubiera inventado el espín del electrón y, entonces sí, cada estado atómico estaría ocupado por un electrón cuando más. Si este invento —el espín del electrón— explicara, además, otros fenómenos (como hubiera sido el experimento de Stern y Gerlach) y fuera un concepto que surgiera naturalmente por otras razones teóricas y experimentales, tanto mejor: los físicos dirían entonces que en la naturaleza el espín del electrón existe y que el principio de exclusión es válido.

Exactamente así procedieron los físicos de partículas elementales para salvar el modelo de los cuarks: le adjudicaron a éstos una nueva propiedad, que en el lenguaje florido de la física moderna llamaron "color".

Hemos dicho que las reglas del modelo de cuarks nos dan, de manera muy económica, la posibilidad de entender cómo están formadas las distintas familias de hadrones, en particular si se les agrupa por el valor de su espín. Para ello es necesario que los cuarks tengan espín semientero igual a $\hbar/2$ y una carga fraccionaria. De acuerdo al teorema de Pauli, los cuarks son entonces fermiones. En consecuencia, estados bariónicos como el Ω^- en que tres cuarks ***s*** ocupan el mismo estado, nos enfrentan a una paradoja: los cuarks han de tener espín semientero pero obedecen la estadística de partículas con espín entero. Esto no parece razonable, pues no hay motivo alguno para que los cuarks no obedezcan un principio general, que siguen al pie de la letra todas las partículas conocidas y que está en el corazón mismo de la física moderna.

En 1964 se sugirió la solución de esta paradoja, solución que recuerda aquella que, hipotéticamente, hubiera seguido Pauli de hallarse en la misma situación: los cuarks tienen otra propiedad, que puede tomar tres valores. A falta de un nombre mejor, a esa propiedad se le llamó color, que desde luego nada tiene que ver con las propiedades visuales del cuark. Cuarks con idéntica masa, carga, espín, extrañeza y todas las demás propiedades medibles, pueden tener tres diferentes colores, digamos rojo, verde o azul. Con ello ya no se viola el principio de exclusión, pues al tener diferente color, los cuarks ya no ocuparían el mismo estado. En el caso de la Ω^- por ejemplo, habría un cuark de cada color y, como en el famoso disco de colores de Newton, el barión resultante se vería blanco, no tendría color.

La regla que hemos enunciado para Ω^- debe ser válida en general para los bariones: cada uno de los tres cuarks que los forman debe tener un color diferente. La regla análoga para los mesones es la siguiente: el cuark y el anticuark dentro de un mesón tienen un color y su complementario (el anticolor), pero cada uno de los tres colores debe estar igualmente representado. Otra vez, los mesones no tienen color. Con estas dos simples reglas, el número de hadrones que pueden formarse con cuarks no se aumenta, a pesar de que el número de cuarks pasó de ser tres en la teoría primera a nueve con la hipótesis del color. En particular, con esta regla se evitan los estados exóticos, como los formados por dos cuarks.

Con lo hasta aquí dicho, la teoría del color parece una mera hipótesis *ad hoc* para salvar al modelo de los cuarks. Si esta extensión del modelo ha de ser real, debe permitirnos predecir nuevos fenómenos, explicar hechos aparentemente no correlacionados entre sí y ligar conceptos teóricos profundos y arraigados en la descripción de la naturaleza. Todo ello ha sido posible, como ahora veremos, con la hipotésis del color. Por eso, a lo largo de los diez últimos años, se ha convertido en una verdadera teoría, la cromodinámica cuántica, que hoy por hoy es la más avanzada para entender el mundo de los hadrones.

Una de las primeras predicciones de la teoría del color tiene que ver con la vida media del pion neutro, que casi siempre se desintegra en dos fotones. Este proceso depende del cuadrado del número de colores presentes en el pion. El valor experimental se explica si se supone que existen tres, y nada más tres, colores. Otra predicción de los cuarks coloreados surge al considerar la aniquilación electrón-positrón a muy altas energías. De este proceso resultan todo tipo de partículas; a veces un grupo de hadrones, otras una pareja muon-antimuón. En todo caso, y a energías muy altas, el cociente ***R*** del número de hadrones al número de pares debe tender a una constante, que es la suma de los cuadrados de las cargas de los cuarks. Si el número de cuarks se triplica, también lo hace el valor de esa constante. Experimentalmente, el número medido para energías cercanas a **3 GeV** va de acuerdo con la teoría del color y contradice el modelo incoloro de sólo tres cuarks, que era el original. Convendría aquí hacer mención de una posibilidad diferente para los cuarks, conocida como el modelo de Han y Nambu. En este modelo se supone que los cuarks tienen carga eléctrica entera, y por ello nos engañan y se ocultan. Por otro lado, el promedio de la carga sobre los tres colores sería el mismo que en el modelo tradicional. Así, el cuark ***u*** rojo y el verde tendrían carga eléctrica **+1**, pero el azul sería neutro: el promedio de la carga sobre los colores vale **2/3**; análogamente, el cuark ***d*** rojo y el verde tendrían carga nula pero el azul carga **-1**: el promedio de estas cargas, igual a **-1/3**, sería otra vez el que introdujo Gell-Mann. Sin embargo, el valor de ***R*** predicho por el modelo de Han y Nambu es muy diferente. Los experimentos a más altas energías, como luego veremos, parecen estar del lado de Gell-Mann.

Aunque la idea del color en los cuarks se ajusta a datos experimentales como los que acabamos de mencionar, y resuelve además la paradoja espín-estadística para los cuarks, no deja de tener mucho de arbitrario. En particular, la pregunta, fundamental y profunda, ¿por qué sólo vemos partículas sin color? queda hasta aquí sin una respuesta satisfactoria.

Indice

XVI. EL ENCANTO DE LOS CUARKS

NO VENDRÍA mal, en este punto de nuestra historia, recolectar lo que hemos descrito. Con ello nos daremos cuenta de las ideas básicas a que ha llegado la física de las partículas elementales y su manera de proceder.

Si descendemos hasta la escala de las partículas elementales —$\mathbf{10^{-14}}$ cm o aun menos—, la materia se caracteriza sólo por unas cuantas propiedades: tenemos la masa (o la energía, que es equivalente), el espín, la carga eléctrica, la extrañeza y otras cuantas características. Tal vez puedan existir algunas otras propiedades, pero en cualquier caso no habrían muchas más. Las partículas conocidas se dividen en dos clases: leptones y hadrones. Sin contar las correspondientes antipartículas, conocemos seis leptones, tres de ellos cargados negativamente y tres neutros. Los leptones cargados son idénticos entre sí, a excepción de su masa: μ es 200 veces más pesado que el electrón, y el tauón lo es aún más. Hasta donde sabemos, los leptones son elementales. Por su parte, los hadrones son sistemas compuestos, que suponemos formados por cuarks. Estos últimos, a semejanza de los leptones, también serían elementales. Sin embargo, y a diferencia de estos leptones, los cuarks están dominados por la interacción fuerte.

La interacción fuerte distingue entre leptones y cuarks. Aquéllos son casi insensibles a la interacción fuerte. Los cuarks actúan uno sobre el otro con las fuerzas electromagnética y fuerte, y con los leptones mediante interacciones electromagnéticas y débiles. De nuestra historia, conocemos ya nueve tipos de cuarks: los *u, d, s,* cada uno en tres colores. A veces se dice que los cuarks pueden venir en diferentes sabores *(u, d* o *s)* y en diferentes colores. Combinando estos cuarks de acuerdo a las reglas de la mecánica cuántica vemos que podemos formar todos los hadrones —bariones y mesones—. Los bariones constan de combinaciones de tres cuarks y los mesones de un cuark y un anticuark; las partículas observadas no tienen color. De un cuark aislado, ni su sombra.

Esta era la situación a mediados de los setentas, cuando los físicos de varias partes del mundo echaron a andar nuevos y potentes aceleradores, que les permitían analizar procesos de mayor energía. Con ellos podían medir el cociente *R,* ya mencionado, entre el número de hadrones y el número de muones que se producen en una reacción dada, a energías cada vez más altas. Ya dijimos que cuando la energía es del orden de 3 GeV, *R* es mayor que la predicha por el modelo original de cuarks. Su valor, cercano a 2, constituyó uno de los elementos que primeramente comprobó la teoría del color. Ahora se podría medir *R* a energías mayores. En el acelerador de electrones de Cambridge, primero, y en el SPEAR de Stanford, después, se obtuvieron valores de *R* superiores a 2: a energías de hasta 8 GeV el valor de este cociente es un poco mayor que 5. Si hemos de ser congruentes, y si además tomamos a los leptones pesados en cuenta, ello implica que los cuarks deben tener más sabores.

El sentido estético de muchos físicos famosos —Sheldon Glashow, de Harvard, entre ellos—, que los empuja a buscar simetrías y coincidencias, había ya previsto tal aumento en el número de cuarks. Cuando, en 1964, la familia de leptones constaba de tan sólo cuatro miembros: $\boldsymbol{e}$, $\boldsymbol{v_e}$, $\boldsymbol{m}$, $\boldsymbol{v_\mu}$ —o sea, antes del descubrimiento del tercer leptón pesado τ—, Glashow y Bjorken, físicos americanos, postularon un cuarto sabor para los cuarks. Encanto, le llamaron, contribuyendo así aún más a la graciosa nomenclatura de la física de partículas. El cuark encantado, que se denotaría por *c* (*de charm*, encanto en inglés), sería más pesado que los otros tres. Daría origen a todo un nuevo conjunto de hadrones, los encantados, cuya masa sería mayor a la de aquellos ya conocidos. La propiedad del encanto, como veinte años antes la de extrañeza, se agregaría a las escasas propiedades de las partículas submicroscópicas. Y, al igual que la extrañeza, inhibiría la desintegración de partículas que contuvieran cuarks encantados, haciendo que duraran mucho más.

En noviembre de 1974, en dos laboratorios norteamericanos, uno en la costa este y otro en la oeste, se encontró una nueva partícula. El grupo de Stanford era capitaneado por Burton Richter y el de Brookhaven

por Samuel Ting, profesor del MIT. Ting y sus colaboradores bombardeaban un blanco de berilio con protones cuando observaron que la producción de pares electrón-positrón aumentaba muchísimo a una energía cercana a los 3 GeV. Por su parte, Richter y su grupo usaban un anillo de almacenamiento para medir el cociente *R* y encontraron grandes anomalías en su valor para esas mismas energías. Ambos grupos, casi simultáneamente, habían descubierto una nueva partícula, —*J* la llamaron en la costa este y ψ en la oeste— que parecía avenirse a un mesón formado por el cuark ***c*** unido al anticuark $\bar{c}$, previsto diez años antes por Glashow y Bjorken. Pronto (un par de semanas después, y no sólo en Estados Unidos sino también en la máquina italiana *Adone*), se hallaron otras resonancias ψ', ψ'',..., que serían estados excitados de ψ, con lo que el descubrimiento de la nueva propiedad, el encanto, comenzaba a reforzarse. Una vez más los alemanes llegaron tarde, y con su DORIS ratificaron el descubrimiento. Ya que encontrar una nueva propiedad de la materia no es cosa de todos los días, Burton y Ting compartieron el premio Nobel en 1975, solamente un año después de su brillante descubrimiento, que llegó a ser conocido como "la revolución de noviembre".

Pero aún hay más. El primero de mayo de 1977, un numeroso equipo de investigadores, cuyo líder era León Lederman, hoy director del Fermilab, descubría en este laboratorio una nueva partícula, conocida como ípsilon, y cuya masa era enorme: 10 veces la masa del protón. Por ello, podía sospecharse que su decaimiento fuera rapidísimo, pues tendría una enorme variedad de estados, de todo color y sabor, en donde decaer. El experimento mostró lo contrario: la vida media de ípsilon resultó anormalmente grande. Esto significa que ípsilon no se desintegra en los hadrones de masa menor, todos ellos formados por cuarks *u, d, s* y *c* La conclusión fue inevitable, y se decretó la existencia de un nuevo cuark, más pesado; este nuevo cuark *b*, ligado a su anticuark $\bar{b}$, sería el constituyente de ípsilon y el quinto miembro de la familia de los cuarks.[1] Si la simetría entre esta familia y la de los leptones vuelve a operar, debería haber un sexto cuark. Muchos físicos creen en su existencia y le han dado un nombre, el cuark *t*, pareja del cuark *b*, aunque todavía hoy, a mediados de 1986, no han sido vistas partículas que pudieran tenerlo entre sus constituyentes.

Después de todos estos descubrimientos, las familias leptónicas y de cuarks tienen numerosos miembros. Aparte de las antipartículas, conocemos seis leptones y, sin contar el color, cinco (o, tal vez también seis) cuarks. En contraste con los leptones, los cuarks libres nunca han sido vistos pero, aparentemente, los físicos de partículas creen en su existencia. Aparte de los ya indicados, el éxito del modelo de cuarks radica en poder predecir el resultado de la colisión entre un electrón y un positrón, ambos de muy alta energía. Como aquí chocan materia y antimateria, estas dos partículas se aniquilan para formar un fotón virtual, que es energía pura. Esta energía puede materializarse en un par cuark-anticuark, los cuales divergen en direcciones opuestas, pues su momento lineal debe ser nulo, como lo era el del par $e^- - e^+$. Aunque no observamos estos cuarks, su energía se invierte en crear nuevos pares $q - \bar{q}$ que se combinan con el par original. Todo ello da origen a dos chorros de hadrones, que recuerdan la trayectoria del par $q - \bar{q}$ original. Estos chorros, en efecto, existen experimentalmente y su presencia da todavía mayor credibilidad al modelo de cuarks. Si todo apunta a que los cuarks existan ¿por qué no los hemos podido ver?

NOTAS

1 Hoy tenemos evidencia también de otros mesones en donde el cuark *b* está ligado a un anticuark de diferente sabor: por decirlo así, se han encontrado partículas con belleza desnuda.

XVII. LAS TEORÍAS UNIFICADAS

EN sus últimos años, cuando trabajaba en el Instituto de Estudios Avanzados en Princeton, Einstein se preocupó enormemente por hallar un marco conceptual que englobara su teoría general de la relatividad con el electromagnetismo. Tal teoría sería ejemplo de una teoría unificada de los campos, en este caso el gravitacional y el electromagnético. Aunque el gran físico falló en su intento, la línea de pensamiento por él marcada quedó impresa en la ciencia y muchos físicos después de Einstein buscaron teorías unificadas. En ellas se trata de englobar, como diferentes manifestaciones de un mismo fenómeno, a algunas de las cuatro fuerzas que existen entre las partículas elementales.

La primera unificación con éxito se logró no como quería Einstein cuando intentó unir la gravitación con el electromagnetismo, sino con la llamada teoría electrodébil, que unifica las fuerzas débiles y las electromagnéticas. Veamos cómo ocurrió esto.

Las diferencias entre la fuerza débil y la electromagnética son mucho más obvias que sus semejanzas. Hasta antes de 1973, esto era aun más evidente: se creía que la interacción débil procedía sólo a través de mensajeros cargados. Estos, a diferencia del fotón, son partículas muy masivas, lo que explica el cortísimo alcance de la fuerza débil, que contrasta con las enormes distancias que el fotón virtual sin masa puede recorrer. Otra característica que distingue las dos fuerzas es su magnitud, como ya hemos mencionado varias veces. Sin embargo, la intensidad de la fuerza débil crece con la energía más rápidamente que el aumento de la interacción electromagnética. Podría ser que, a energías muy altas, ambas fuerzas tuvieran idéntica intensidad, o que incluso la débil fuera mayor que la electromagnética; sería sólo el muy corto alcance de la interacción débil lo que hiciera su efecto menor que el de la electromagnética. Finalmente, las interacciones débiles violan la paridad,[1] cosa que no hacen las otras fuerzas.

A pesar de estas diferencias, hay características importantes que comparten ambas interacciones: su universalidad, para empezar, y el carácter de sus mensajeros, en segundo lugar. En efecto, todas las partículas —leptones y hadrones— sufren estas fuerzas, lo que no ocurre con la interacción fuerte, que sólo actúa sobre los hadrones. La otra semejanza importante es el carácter del bosón mensajero de la interacción débil, cuyo momento angular es el del fotón: ambos tienen espín igual a $\hbar$; por ello, se le llamó el bosón vectorial intermedio.

A pesar de lo anterior, muchos físicos propusieron nuevas teorías del campo para unificar las interacciones débiles y las electromagnéticas; hoy se les llama teorías de campos de norma. En ellas se supone una nueva simetría, inobservada, entre las fuerzas débil y electromagnética. La teoría electrodébil que finalmente echó raíces fue desarrollada por Steven Weinberg, de Harvard, e independientemente por Abdus Salam, físico paquistano, investigador del Imperial College de Londres y director del Centro Internacional de Física Teórica, cuya sede está en Trieste. Ellos, en un sentido u otro, generalizaron el trabajo que Yang[2] y Mills habían realizado en 1954.

Ya hemos mencionado varias veces que la teoría más precisa que han generado los físicos es la electrodinámica cuántica. Esta es una teoría en que, cambiando parámetros simples —por ejemplo, la masa y la carga del electrón—, pueden obtenerse resultados sorprendentes: para el momento magnético del electrón, digamos, el número que se obtiene teóricamente es (en las unidades apropiadas) 1.0011596553, mientras que el valor medido experimentalmente es 1.0011596577. Tal concordancia entre ambos números, hasta 9 cifras significativas, no tiene precedente en la física de todos los tiempos. Teorías de campo como la electrodinámica cuántica, donde se usan valores apropiados de algunos parámetros simples como la masa y la carga, se llaman renormalizables.

Pues bien, Weinberg y Salam encontraron la teoría electrodébil renormalizable, con la cual pueden predecirse varios resultados experimentales. Para ello, sin embargo, debieron suponer que no había uno,

sino tres bosones vectoriales intermedios: el W^+ cargado positivamente, el W^- con carga negativa, y un tercero, la partícula Z^0 , que sería neutra. Estos tres bosones, junto con el fotón, serían los mensajeros de las fuerzas electrodébiles.

Aquí encontramos el primer valladar que la teoría de Weinberg y Salam debió saltar. No sólo habría interacciones débiles con mediadores cargados (como en el proceso débil por antonomasia, el decaimiento del neutrón, la desintegración β), sino también existirían los procesos débiles neutros eléctricamente. Durante muchos años, estos procesos de corrientes débiles neutras, como se les llegó a conocer, eludieron su detección. Sin embargo, un grupo, formado por decenas de investigadores del CERN en Ginebra, observó en 1973 varios procesos, como la colisión de $\bar{\nu}_\mu$ por electrones o el choque entre neutrinos y protones, que sólo pueden explicarse por el intercambio de Z^0. En estos experimentos jugaba un papel distinguido el físico italiano Carlo Rubbia, hoy en Harvard. Diez años después, el mismo Rubbia empleó un complicado detector para descubrir, en un bello experimento en que chocan un protón y un antiprotón, los bosones $W^\pm$ y Z^0. En uno de cada cinco millones de choques entre protones y antiprotones en el acelerador del CERN, un cuark del protón se aniquila con un anticuark del antiprotón para dar origen luego al bosón vectorial intermedio. Estos bosones podían identificarse plenamente con los requeridos por la teoría electrodébil, dándole así una consistencia inusitada. Por ese trabajo, Rubbia y el físico holandés Simon van der Meer, también del CERN, recibieron el premio Nobel de física correspondiente a 1984.

Ya que la electrodinámica cuántica y la teoría electrodébil, ambas teorías cuánticas del campo de norma, tuvieron tal éxito, se antoja ser más ambiciosos y preguntarse si no habrá una teoría de norma, también renormalizable, para las interacciones fuertes, es decir, para predecir el raro comportamiento de las cuarks. Una teoría tal ha sido desarrollada en los últimos años y, por su conexión con el color, se le ha llamado cromodinámica cuántica. Con ella a la mano podremos, finalmente, entender el confinamiento de los cuarks, el porqué son tan elusivos y por qué nunca los hemos podido ver libres.

NOTAS

1 La conservación de la paridad implica que en el universo no haya distinción entre izquierda y derecha: al penetrar en un mundo espejo del nuestro, donde izquierda y derecha se intercambien, las leyes de la naturaleza permanecerán invariantes. En 1956, dos físicos chinos, C. N. Yang y T. D. Lee, sugirieron, para explicar la extraña desintegración del mesón extraño *K*, que la paridad podía violarse. Al comprobarse experimentalmente sus ideas unos cuantos meses después (con el trabajo realizado por una amiga de ambos, la doctora Wu, también china de origen), Yang y Lee se volvieron famosos y recibieron el premio Nobel de física en 1957. Ahora sabemos que sólo las interacciones débiles violan la paridad.

2 Como Gell-Mann, C. N. Yang también trabajó en Chicago bajo la dirección de Fermi. Resulta notable la escuela dejada por el gran físico italiano; muchos de los que han contribuído recientemente a la fisica de partículas de manera importante fueron alumnos de Enrico Fermi. Lo mismo había ocurrido en las primeras décadas de este siglo, en que la mayoría de los grandes experimentadores estaban bajo la influencia —directa o indirecta— de Rutherford y los grandes teóricos hablan recibido las ensenanzas de Niels Bohr, quien los reunía en su instituto de Copenhague, financiado por la fábrica de cerveza Carlsberg.

Indice

XVIII. LOS CAMPOS DE NORMA

LA FÍSICA ha visto ocurrir dos grandes revoluciones en el siglo XX: la revolución relativista de 1905 y la revolución cuántica de 1924. Ambos cataclismos científicos cambiaron, de manera tremenda y radical, la imagen que el hombre se había hecho de la naturaleza. Espacio, tiempo, energía, y tantos otros elementos de las teorías físicas fueron vistos desde una nueva perspectiva. Por otro lado, con la mecánica cuántica, la idea de forma —y con ella, de una manera profunda, la simetría— entran en la descripción física del mundo natural. Al unir los postulados relativistas con los cuánticos, se obtienen dos grandes logros: la teoría cuántica de los campos y el reconocimiento del papel vital que juegan los principios de simetría.

Del primer gran logro ya hemos hablado. Si unimos el principio de incertidumbre al de relatividad, la descripción de un fenómeno en apariencia tan simple y tan bien conocido como el de la atracción entre dos cargas eléctricas adquiere visos extraños, casi fantasmagóricos. Así surge el apantallamiento de la carga eléctrica, aun en el vacío.

Para la física clásica, la del siglo XIX, tal apantallamiento de la carga eléctrica era un fenómeno bien conocido. Se conoce como polarización del medio y ocurre cuando una carga se coloca dentro de un material, como un dieléctrico, que contiene tanto cargas positivas como negativas. El electrón que se ha introducido repele a las cargas negativas y atrae a las positivas, polarizando así al medio. El resultado de esta polarización es que, vista de lejos, la carga negativa del electrón parece más pequeña, se ve apantallada por las cargas positivas que tienden a rodearlo. Para sentir la verdadera carga del electrón, tendremos que acercarnos mucho a él, más allá de la pantalla. Hasta aquí la idea prevaleciente en la electrodinámica clásica.

Si seguimos la línea de pensamiento clásica, un electrón en el vacío no ha de sufrir los efectos del apantallamiento. El vacío clásico es un mar de tranquilidad, sin partículas, cargas o energía. Pero el principio de Heisenberg cambia radicalmente esta visión. A medida que inspeccionamos un sistema —el vacío, en el caso que nos ocupa— durante tiempos cada vez más cortos, alteramos su energía, tanto más cuanto menor sea ese tiempo de observación. Y si ahora agregamos las ideas relativistas, según las cuales masa y energía son la misma cosa, vemos que una fluctuación en energía puede manifestarse como masa: las partículas pueden llegar a materializarse de la nada durante tiempos cortos. El vacío (cuántico-relativista), pues, dista mucho de ser ese mar sereno que es el vacío clásico. En él se crean y se aniquilan partículas virtuales, que siempre vienen en parejas partícula-antipartícula para conservar la carga y otras cantidades. Esas fluctuaciones del vacío serían también polarizables por un electrón externo que se agregara al vacío, igual que se polarizó el medio dieléctrico que antes consideramos desde el punto de vista clásico. En consecuencia, el vacío se polariza y la carga de un electrón aislado se ve apantallada y decrece, en efecto, con la distancia. Esta es una conclusión ineludible si se unen las dos grandes revoluciones de la física contemporánea para crear la teoría del campo electromagnético: la electrodinámica cuántica. El apantallamiento de la carga eléctrica es una de tantas consecuencias de esta teoría que, como ya hemos mencionado varias veces, es la teoría física que mayores éxitos ha tenido en la historia de la ciencia.

Hablemos ahora de los principios de simetría y su papel preponderante en la física moderna. Todos tenemos una idea intuitiva de lo que es la simetría y la asociamos, muchas veces, con la belleza. Un rostro hermoso de mujer es bello por simétrico[1] y la enorme dignidad del Partenón descansa primordialmente en su simetría. Si reflexionamos, en nuestros ejemplos hemos apuntado a la simetría geométrica: la simetría bilateral de un rostro armónico, o la simetría traslacional del templo griego con sus columnas dispuestas ordenadamente. Si reflejamos en un espejo el frontón de un templo clásico (y hacemos caso omiso del friso), en nada lo afectamos; si giramos una circunferencia, por cualquiera que sea el ángulo, nada permite que nos percatemos de la rotación. La simetría está asociada, pues, a la invariancia y a la conservación.

En la física relativista el espacio se ha convertido en el espaciotiempo y con la mecánica cuántica hace su advenimiento en la ciencia el concepto de forma. Al unir ambas teorías, se generan conceptos como el del espín y luego surgen, al estudiar las partículas elementales, la carga, el espín isotópico, la extrañeza y el color. No ha de asombrarnos entonces que la riqueza de las simetrías sea ahora mucho más amplia que aquella de la mera geometría espacial.

En efecto, de la simetría frente a traslaciones en el tiempo surge la conservación de la energía; podemos rotar ahora en el espacio y en el tiempo a la vez, girando en el espaciotiempo, y nuestras ecuaciones no han de alterarse; podemos también cambiar en el espacio de las cargas o el del espín isotópico y, muchas veces, todo permanecería igual, como casi idénticos resultan el protón y el neutrón. O podemos ir más allá, haciendo transformaciones en espacios cada vez más abstractos y alejados de nuestra intuición cotidiana. Ejemplo de esto último es la simetría ***SU*(3)**, que llevó a Gell-Mann por la vía del octete al modelo primigenio de los cuarks.

Todas las simetrías que hemos mencionado tienen un carácter global: alguna de las características del sistema, cualquiera que ella sea, se altera por una cantidad que es la misma en todos los puntos del espaciotiempo. Desde el punto de vista matemático, la simetría surge cuando las soluciones de un conjunto de ecuaciones permanecen inalteradas, a pesar de que alguna de las características del sistema físico que esas ecuaciones describen se haya alterado. Cuando este cambio es el mismo en todos los puntos del espaciotiempo, se dice que la simetría es global.

Empero, también podríamos tener una simetría local. Imaginemos que, en cada punto del espaciotiempo, aquella característica del sistema que alteramos se cambia de manera diferente. Si la ley física que analizamos mantiene su validez, se dice que tiene simetría local. A primera vista, la simetría local es menos exigente que la global pero, en verdad, es más difícil de lograr. En particular, si habíamos de una teoría del campo y deseamos que ésta sea invariante frente a una transformación local, surge *a fortiori* una interacción, aunque al inicio no la hayamos considerado. En otras palabras, la fuerza es algo nuevo y necesario en la teoría. Estas nuevas teorías de campo con simetría local —teorías de campo de norma, las llaman hoy los físicos— implican que las partículas y sus interacciones están íntimamente ligadas entre sí y que no pueden existir unas sin las otras.

Los campos de norma tienen una historia ya antigua. La primera teoría de campos de norma fue, de hecho, la electrodinámica clásica que Maxwell formuló a mediados del siglo XIX. En esta teoría clásica se supone que alrededor de una carga eléctrica estática se genera un campo eléctrico, o también un voltaje o potencial eléctrico; la diferencia de voltaje entre dos puntos cualesquiera del espacio proporciona el campo. Al mover las cargas se engendra un campo magnético, que también puede obtenerse de un potencial, llamado potencial magnético. El potencial eléctrico puede alterarse global o localmente. Si aumentamos el voltaje en la misma cantidad de voltios en todo un laboratorio, nadie se entera, pues el campo eléctrico no cambia. Pero si alteramos el voltaje localmente, los habitantes del laboratorio sí sentirán los cambios, a menos que también se altere, al mismo tiempo y en el mismo punto, el potencial magnético en la forma precisa que indica la teoría de Maxwell. Con ello imponemos a la electrodinámica clásica la llamada invariancia de norma. Como bien saben los físicos, imponer esta invariancia de norma conduce en la teoría clásica de Maxwell a las ondas electromagnéticas. En su versión cuántica, éstas son conjuntos de fotones, los portadores de la fuerza. Vemos aquí un ejemplo de lo antes dicho: para resarcir la simetría local es necesaria la aparición de fuerzas.

Otra teoría invariante de norma, también clásica, es la teoría general de la relatividad, donde la geometría del espaciotiempo es el campo. El nombre mismo de invariancia de norma fue acuñado por el gran matemático alemán Hermann Weyl, quien alrededor de 1920 buscaba unificar la gravitación y el electomagnetismo. Weyl quería que sus ecuaciones fueran invariantes frente a un cambio de escala en las longitudes y los tiempos, cambio que sería diferente para cada punto del espaciotiempo. Se usaría así un distinto "patrón" de medida en cada punto, una diferente "calibración" de distancias y tiempos; en fin, una "norma" que varía de punto a punto.[2]

La historia moderna de los campos de norma se inicia en 1954, como ya dijimos, con el trabajo de Yang y Mills, trabajo al que hoy se da un gran reconocimiento. Yang y Mills consideraron una simetría local más complicada que la del electromagnetismo, pues estaban interesados en generar un modelo para las interacciones fuertes. Pensaron en las rotaciones en el espacio de espín isotópico, aquella propiedad cuántica que distingue entre protones y neutrones; y postularon que ante estas rotaciones, la fuerza nuclear es ciega. Puesto que las transformaciones locales de Yang y Mills son más complejas que las del electromagnetismo, sus resultados también lo son. A diferencia de la teoría electromagnética, donde a consecuencia de la invariancia local de norma surgen dos campos vectoriales, el eléctrico y el magnético, la teoría de Yang-Mills exige que se generen seis campos de fuerza, todos ellos vectoriales. Aunque dos de estos campos de fuerza no llevan, como en la electrodinámica, carga, los otros cuatro ¡están cargados! Esto último tiene consecuencias enormes. Los fotones o cuantos de estos campos estarían cargados, por lo cual podrían atraerse y quedar amarrados uno al otro: tendríamos algo así como un átomo de luz. Con fotones cargados, nuestro mundo sería tan diferente al que conocemos que sería difícil de imaginar. Desde luego, estos fotones cargados no existen en la naturaleza.

Desde un punto de vista matemático, por otro lado, para los campos de Yang-Mills el orden en que se apliquen las transformaciones locales de simetría es importante: el resultado final es diferente si una transformación dada precede a otra, o viceversa. Por ello, y copiando la nomenclatura de esa rama de las matemáticas que se conoce como teoría de los grupos, se dice que el campo de norma de Yang-Mills es un campo no-abeliano. La teoría general de la relatividad es también una teoría no-abeliana, pero la electrodinámica es abeliana[3], y por ello es una teoría más simple.

Hemos dicho que ahora se concede una importancia fundamental al trabajo de Yang y Mills. Esto es hoy, porque cuando fue presentada, hace más de treinta años, esa teoría no se apreció en todo lo que valía. Había una razón de fondo: la teoría de Yang-Mills en su forma original no es renormalizable. Por el contrario, está plagada de infinitos, como lo estuvo la electrodinámica cuántica hasta que los físicos encontraron las fluctuaciones del vacío y el correcto apantallamiento de las cargas eléctricas. Ahí se dieron cuenta de lo que realmente se mide en los experimentos con electrones; lo que en verdad se observa no es la masa o la carga de la partícula puntual que inicia el proceso, sino las propiedades de esta partícula apantallada, es decir, del electrón y sus acompañantes, esa nube de partículas virtuales que siempre lo rodean.

¿Cómo se enmendó la plana a la teoría de Yang y Mills para lograr una teoría renormalizabl e y, por tanto, útil? La historia es curiosa y bien podría dejar en la física moderna una nueva gran ilusión: los bosones de Higgs. Los portadores de la fuerza en la teoría original no tienen masa. Sin embargo, los físicos Robert Brout, de Bruselas, y Peter Higgs, escocés, idearon un mecanismo por el cual los bosones de Yang y Mills podrían adquirir masa y así convertir la teoría de norma no- abeliana en renormalizable. La nueva idea supone que el vacío está poblado por los bosones de Higgs, y que éstos literalmente son tragados por los portadores originales de la fuerza, que carecían de masa. Por ello se tornan masivos y los bosones de Higgs se convierten en fantasmas. Este mecanismo se conoce, en la teoría cuántica de los campos, como "rotura espontánea de la simetría" y se aplica en muchos campos de la física, en el estudio de los ferromagnetos o en el de los superconductores, por ejemplo. En todo caso, la moraleja que hoy se acepta de esta historia es muy interesante: parecería ser que las cuatro interacciones fundamentales que hemos encontrado en la naturaleza estarían regidas por teorías de campo de norma no-abelianas.

NOTAS

1 Aunque también llegamos a apreciar enormemente ese ligero rompimiento espontáneo de la simetría que representa un gracioso lunar junto a los ojos.

2 De ahí el nombre "invariancia de norma" que usamos en México, aunque en España a veces se usa "invariancia de aforo" u otras frases, todas ellas intentos de traducción del inglés, *gauge invariance.*

3 El adjetivo abeliano lo usan los científicos en recuerdo del matemático noruego Niels Abel, uno de los

primeros en analizar el concepto matemático de grupo. Este es el lenguaje apropiado para tratar con simetrías e invariancias. Por ello, los grupos matemáticos son hoy omnipresentes en la física de partículas elementales, en la teoría del campo cuántico y en otras importantes ramas de la física actual, como la de las transiciones de fase y los fenómenos críticos, por ejemplo.

XIX. PANTALLAS Y CAMUFLAJES

AL UNIR las ideas de los campos de norma con los cuarks de colores surgen, desde luego, los portadores de la interacción fuerte. Estos son, como en la teoría electrodébil de Weinberg y Salam, bosones vectoriales. Ya que ahora tratamos con una simetría local más compleja, los portadores de la fuerza son más complicados: se requieren ocho partículas sin masa, los gluones (de la palabra inglesa *glue*, pegamento) para ligar a los cuarks entre sí. El cuark, al tener cargas de color, emite gluones, igual que un electrón emite fotones porque está cargado eléctricamente.

Ésta es la teoría del color para las interacciones fuertes y se le llama, por sus analogías con la electrodinámica cuántica, la cromodinámica cuántica; es una teoría del campo de norma no-abeliana. Por ello, los portadores mismos de la fuerza, los gluones, llevan consigo el mismo tipo de cargas que las fuentes que los crean. En otras palabras, como los cuarks, los gluones también están coloreados: cada uno de ellos lleva a cuestas un cierto color y otro anticolor dado. Puesto que hay tres colores y tres anticolores, podría pensarse que deberían haber nueve y no ocho gluones. Sin embargo, cuando el color y el anticolor del gluon son uno el inverso del otro, el gluon es blanco. Este gluon, con cargas verde-antiverde, roja-antirroja y azul-antiazul en iguales proporciones, no es pues efectivo como mensajero de la fuerza; de ahí que sean sólo ocho los gluones que cuenten.

Que los bosones intermedios lleven cargas de color induce un comportamiento raro en las interacciones fuertes y en la forma como cambia esta fuerza con la distancia entre los cuarks. Como en el caso eléctrico, las cargas de color también se apantallan por la polarización del vacío: se crean pares $q - \bar{q}$ virtuales y cualquier cuark que se añadiere al vacío los podría atraer o repeler. Pero, además, el cuark emite y reabsorbe gluones con carga de color. Ello implica que la carga de color del cuark se desparrame a su alrededor, sirviéndole así de camuflaje. El resultado neto, que puede calcularse si se usa la cromodinámica cuántica, es el siguiente: a distancias cortas, menores que en fermi, la interacción fuerte se debilita y los cuarks parecen ser libres; pero a distancias grandes, la fuerza crece y es difícil arrancar a los cuarks. Con ello la paradoja de los cuarks empieza a disolverse.

En resumen, la cromodinámica cuántica nos dice que los cuarks son asintóticamente libres, a distancias muy cortas, pero que están siempre confinados. Con ello nos explica aquellos experimentos según los cuales parecería que el protón estuviera formado por tres cuarks libres, al mismo tiempo que entendemos por qué nunca hemos podido ver un cuark libre.

Para intuir mejor este resultado de la cromodinámica cuántica, teoría en que se unen las ideas del color a las de los campos de norma y los conceptos cuánticos con los relativistas, es útil recordar lo que ya sabemos de la primera y de la segunda espectroscopías. Para arrancar un electrón de un átomo, es necesario darle una energía que es cercana a las decenas de electrón-voltios. Por su parte, el amarre de un protón en el núcleo se rompe si a éste le impartimos una energía equivalente a unos cuantos millones de eV. En ambos casos, la energía necesaria para liberar los constituyentes del sistema es mucho menor que la energía en reposo —es decir, la masa— de la partícula que ha de arrancarse. Así, la masa del electrón es del orden de medio millón de eV, y la de un nucleón es un poco mayor que 900 MeV, ambas muchísimo más grandes que las energías de amarre correspondientes. En contraste, en la tercera espectroscopía, la de los cuarks, se requiere dar a éstos para arrancarlos una energía de al menos 10 GeV, que basta para engendrar un par cuark-anticuark. El cuark que se aleja del protón y que está a punto de ser libre, se encuentra con este par $q - \bar{q}$ virtual y se une al anticuark para formar un mesón; el nuevo cuark, por su parte, ocupa el lugar del viejo y reconstituye el nucleón original que buscábamos destrozar. En vez de generar un cuark aislado, lo único que hemos logrado es formar un mesón sin color.

De lo anterior podríamos pensar que nuestras ideas sobre la interacción hadrónica son ya firmes. Los hadrones, incoloros, sienten los vestigios de la verdadera interacción fuerte, aquella producida por las

cargas de color que tienen los cuarks. Lo que se llamó, allá por los treintas, la fuerza nuclear, y que es la que liga a los protones y neutrones para formar núcleos, es semejante a la fuerza que une a dos moléculas, que son conjuntos de átomos. Estos últimos actúan uno sobre el otro por medio de la fuerza electromagnética que liga los electrones al núcleo, y cuando una molécula se halla frente a otra sólo resta un pálido recuerdo de esta fuerza. De manera semejante, un protón y un neutrón serían moléculas de cuarks ligados por la interacción fuerte: la fuerza nuclear entre protones y neutrones es el recuerdo de la fuerza de color que los cuarks se ejercen.

Con la teoría electrodébil y la cromodinámica cuántica, ambas teorías del campo de norma, hemos avanzado enormemente en nuestra comprensión del mundo de las partículas elementales. Contamos ya con un marco conceptual unificado de las fuerzas electromagnéticas y de las interacciones débiles, así como con una teoría de las fuerzas nucleares. Sospechamos que los leptones y los cuarks son realmente elementales y podrían, por lo tanto, ser esos átomos que el hombre ha buscado desde la Antigüedad. ¿Qué más nos queda por hacer?

Indice

XX. LA GRAN UNIFICACIÓN

AL MIRAR, con un dejo de sarcasmo y una buena dosis de escepticismo, lo que ha progresado la humanidad en veintitantos siglos de preocuparse por los átomos, tal vez diríamos que mucho no hemos avanzado. En la teoría de las partículas elementales, tal y como la hemos expuesto hasta aquí, intervienen al menos 34 personajes: quince cuarks (de cinco sabores y tres colores) y seis leptones, que fungirían como "átomos"; los doce portadores de las fuerzas, entre ellos los ocho gluones que acarrean la interacción fuerte, el fotón electromagnético y los tres bosones vectoriales intermedios que llevan el mensaje de la fuerza débil; y finalmente, el bosón de Higgs que puebla el vacío y que nos permite renormalizar las teorías de campo de norma. Con un poco de cinismo, bien podría pensarse que el avance sobre la imagen griega de la materia, con sus cuatro elementos —tierra, aire, agua y fuego—, ha sido magro en verdad. Aunque lo último es evidentemente falso, no dejamos de sentir un gusanillo por saber más, por llevar la unificación de nuestros conceptos un paso más allá. Esto es precisamente lo que han hecho los físicos en los últimos años.

¿Cuáles preguntas quedarían sin respuesta satisfactoria si nos contentáramos con la teoría electrodébil y la cromodinámica cuántica? Meditando un instante, podemos formular una media docena de cuestiones: ¿En qué forma están emparentados los cuarks y los leptones? ¿De qué manera podemos predecir sus masas? ¿Podría ser que las intensidades de las fuerzas débil, electromagnética y fuerte, se igualaran cuando la energía de los procesos fuera muy grande? ¿Existe, en realidad, el bosón de Higgs, y cuál sería su masa? ¿Cómo tomar en cuenta a la gravedad en todo lo anterior? ¿Podemos explicarnos que en la vecindad de nuestro mundo haya preponderantemente materia, a pesar de que nada rompa la simetría de ésta con la antimateria?

Las respuestas a algunas de estas preguntas podrían, tal vez, esbozarse hoy con lo que llamamos la gran unificación. En tal teoría se busca englobar dentro del mismo marco teórico a las interacciones fuertes y débiles con las electromagnéticas. Hasta el momento, la gravitación no ha podido unificarse con las otras tres fuerzas. El sueño de Einstein no se ha convertido aún en realidad.

Varios hechos inducen a pensar en una gran teoría unificada. Tenemos, por un lado, las semejanzas entre cuarks y leptones. Ambos tipos de partículas aparentan ser elementales; ambas son fermiones y tienen un espín igual a $\hbar/2$. Aunque el cuark tiene carga de color y los leptones no, las dos familias están cargadas eléctricamente y resienten la interacción débil. Además, la carga eléctrica de los cuarks está relacionada con la del electrón de una manera relativamente simple y, en todo caso, muy específica.

Por su parte, las tres interacciones presentan ciertas características que sugieren una posible unificación. Ya dijimos que las tres fuerzas pueden describirse por un campo de norma, con sus apantallamientos y camuflajes. La carga eléctrica crece a distancias menores, es decir, a mayores energías; en contraposición, la carga de color se debilita al analizar procesos de más alta energía. Podría ser, ¿por qué no?, que a energías altísimas, todas las interacciones tuvieran la misma intensidad.

Si recordamos la historia de las diversas teorías de campos de norma, nos damos cuenta de su íntima conexión con las simetrías dinámicas de la naturaleza, y de ahí con la rama de las matemáticas conocida como teoría de grupos. Para unificar las tres fuerzas, necesitaríamos construir un campo de norma basado en una simetría local mayor, que incluya tanto la de la teoría electrodébil como la de la cromodinámica cuántica. Esto se ha hecho con grupos como el $SU(5)$, el grupo de transformaciones unitarias en 5 dimensiones, aunque existen muchas otras estructuras matemáticas posibles. En todos los casos, surgen bosones intermedios que llevarían la interacción de unas partículas a otras: los cuarks podrían transformarse en otros cuarks, los leptones a su vez en otros leptones, pero también habría transformaciones de cuarks a leptones y viceversa. De aquí obtenemos una conclusión valida en cualquier teoría que unificara las tres fuerzas: el protón, por ejemplo, sería inestable y daría lugar a un antileptón

(como un positrón) y a un mesón (como el π^+), entre otros modos de decaimiento.

Diversas teorías unificadas predicen vidas medias distintas para el protón, aunque todas ellas son larguísimas, $\mathbf{10^{31}}$ años o más. De hecho, sabemos que la velocidad de decaimiento no podría ser muy grande, pues entonces nuestro propio cuerpo se dañaría con la radiación resultante. Para detectar una vida media tan larga como la del protón, es necesario contar con muchísimos de ellos, $\mathbf{10^{33}}$ o más. Esto puede lograrse si analizamos con cuidado lo que ocurre en un tanque de agua suficientemente grande. Para evitar confusiones, es mejor ocultar el recipiente y aislarlo hasta donde sea posible de los rayos cósmicos. Por ello estas mediciones se realizan llenando grandes recipientes de agua y colocándolos en minas profundas o en túneles como el del Monte Blanco. Hasta la fecha, mediados de 1986, no se ha determinado la vida media del protón; sólo ha podido establecerse que no sería menor que $\mathbf{10^{32}}$ años, cifra que definitivamente no concuerda con teorías unificadas como las que se basan en el grupo ***SU(5)***. En ellas no está la solución deseada, que deberemos buscar en modelos conceptualmente más amplios.

Indice

EPÍLOGO

La historia que acabamos de relatar es sin duda una historia de aventuras, aventuras del hombre y de su ciencia para entender cómo está hecha la materia. En esta historia se entrelazan todas las ramas de la física y muchas de la química. En el siglo XIX fueron cruciales la teoría cinética de los gases y el esclarecimiento de muchos fenómenos eléctricos y magnéticos; al inicio del presente siglo, el estudio del átomo nos condujo a un nuevo esquema físico, la mecánica cuántica, y desde los treintas la física nuclear hizo aparecer en escena dos nuevas fuerzas y todo un cúmulo de partículas elementales. Ello sigue siendo válido hoy: así, la física nuclear interviene todavía cuando se bombardean núcleos pesados con muones y surge la posibilidad de ver el cuark, libre en apariencia mientras no intente birlar su confinamiento; y la física de la materia condensada contribuye de manera radical, pues entre otras cosas el entender la superconductividad ha permitido experimentos como el de Cabrera —donde se perseguía a otra gran ilusión de la física moderna, el monopolo magnético— y ha sido indispensable para diseñar nuevos y más potentes aceleradores, como el Tevatrón de Fermilab o el más grande SSC que hoy se disputan tantos laboratorios norteamericanos. Y, por solo mencionar un campo a primera vista tan ajeno al estudio de la física de altas energías, es hoy clara la relación entre las transiciones de fase y la teoría de las partículas elementales. Con ello tal vez podamos entender en un futuro próximo cómo surgen las cuatro interacciones —la fuerte, la electromagnética, la débil y la gravitacional— de una sola fuerza, que podríamos llamar la fuerza ultra-unificadora. Quizá eso nos lleve a comprender la evolución del Universo después de la Gran Explosión.

Hoy, a finales de 1986, creemos que la materia está hecha de seis cuarks y seis leptones que interactúan por medio de esas cuatro fuerzas. Son estos cuarks y leptones los mejores candidatos que la física moderna puede ofrecer para reemplazar a los átomos de Demócrito. Aunque estos constituyentes básicos de la materia tienen todo tipo de características —masa, espín $\hbar/2$ y muchas otras propiedades físicas— hasta donde hemos averiguado son puntuales, sin estructura interna, en verdad elementales.

En cuanto a las fuerzas, la historia de la física desde Newton es la historia de la unificación de las fuerzas. Tal vez el logro mayor de Newton, expuesto magistralmente en el libro III de sus *Principia Mathematica,* haya sido identificar la fuerza que hace caer la manzana en la tierra con aquella que hace girar a ésta alrededor del Sol. Y, que duda cabe, la sintésis que Maxwell consiguió a mediados del diecinueve, al englobar en un sólo marco conceptual los fenómenos eléctricos y los magnéticos y unidos con la óptica, es una de las grandes hazañas de la física.

En los últimos tiempos el progreso en la unificación ha sido espectacular. Los físicos, guiados por la teoría cuántica del campo y los conceptos de simetría, han logrado describir correctamente a las fuerzas como intercambio de los cuantos de varios campos, que son bosones con espín $\hbar$. Resalta entre todas estas teorías —las teorías de los campos de norma— la electrodinámica cuántica, cuyas predicciones no tienen parangón en la física. Ella ha servido de modelo, además, a la teoría cuántica de las interacciones fuertes, la cromodinámica cuántica, que nos permite entender por qué los cuarks parecen libres a cortas distancias a pesar de que sea imposible verlos libres. La teoría cuántica del electromagnetismo ha sido, también, donde se ha iniciado el camino hacia una mayor unificación de las fuerzas: hace menos de veinte años se generó la teoría electrodébil, que engloba a las fuerzas producidas por el intercambio de los fotones con aquellas que surgen al mediar los cuantos W^+, W^- y Z, bosones intermedios pesados que acarrean la fuerza débil.

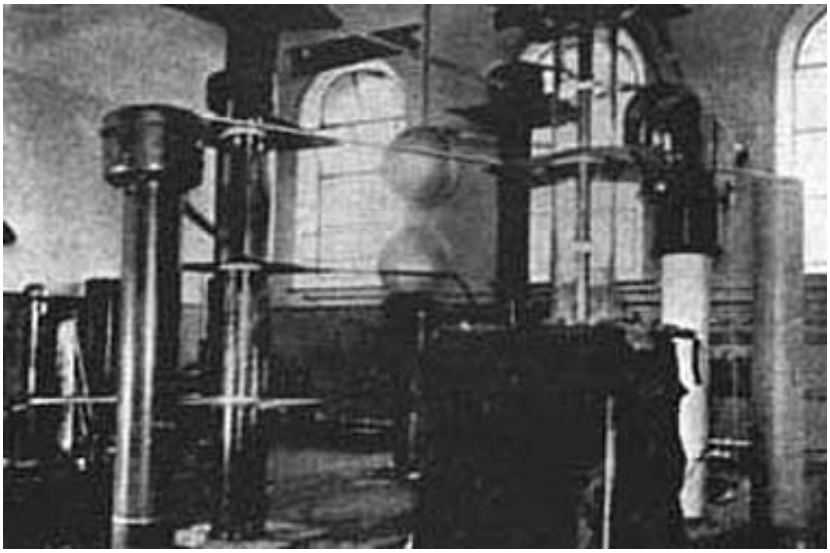
A diferencia de la teoría electrodébil, cuyas conclusiones han sido verificadas por el experimento, la gran teoría unificada —donde se unen las interacciones electromagnéticas y las nucleares, fuerte y débil— no ha sido establecida todavía. La más simple de ellas, la basada en el grupo $SU(5)$, falló al predecir la vida media del protón. Hoy están en boga otras teorías, como las de las llamadas supercuerdas, que tal vez no perduren. Proliferan las especulaciones y se inventan nuevos conceptos día con día. Algunos perecerán y otros quedarán para formar parte de nuestra imagen física del mundo. Aquellos que sobrevivan serán los que

pasen la dura prueba del experimento. Para ello parece indispensable construir aceleradores, como el **SSC**, más potentes que los actuales.

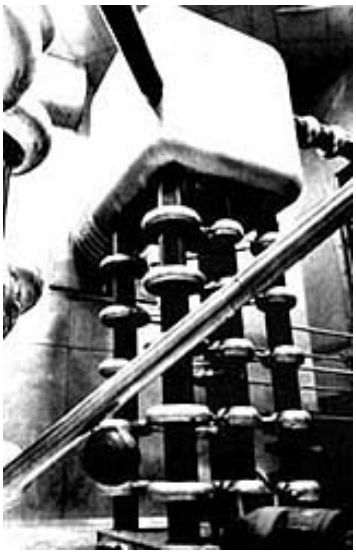
Con ellos, el sueño de Einstein tal vez se haga realidad. Por ello, los físicos continúan buscando...

Indice

HISTORIA GRÁFICA DE LOS ACELERADORES DE PARTÍCULAS.

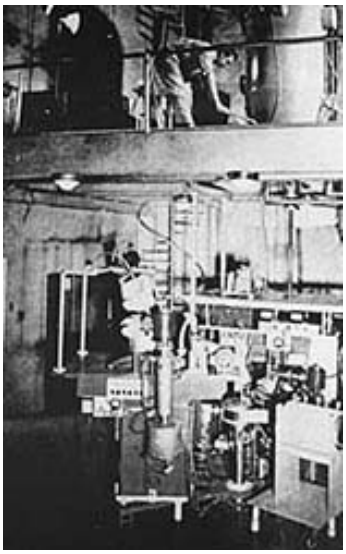


En el Laboratorio Cavendish de la Universidad de Cambridge, Cockcroft y Walton construyeron este acelerador de 500 kilovolts en 1932.

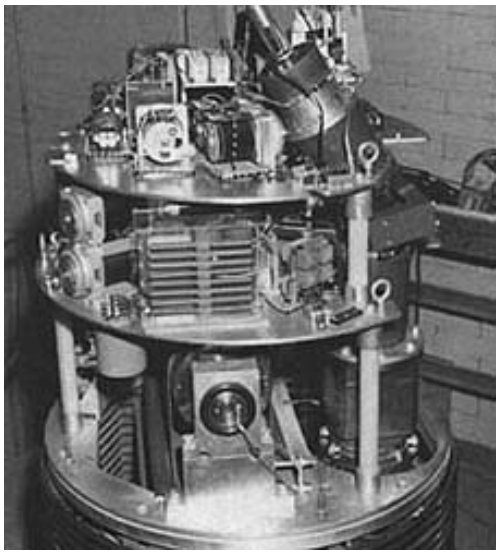


La versión moderna de un acelerador Cockcroft-Walton se usa hoy en el Fermilab como un preacelerador.

El acelerador de 2.7 MeV desarrollo por Robert Van de Graaff e instalado en el instituto Tecnológico de Massachusetts en 1937.

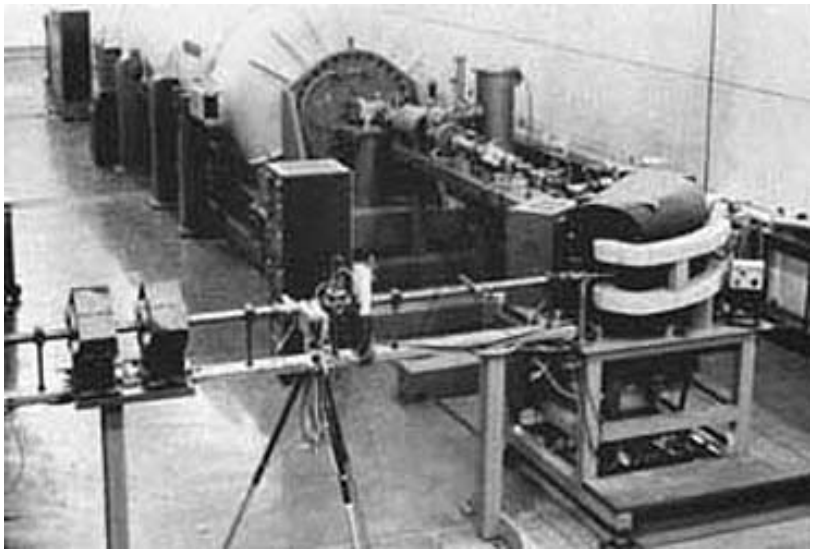


Acelerador electrostático de 2 Mev tipo Van de Graaff perteneciente al Institutto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México desde 1952.

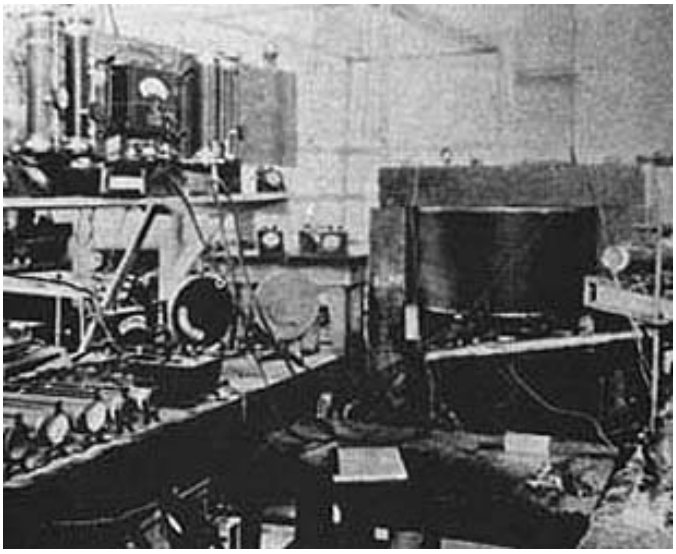


Fuente de iones del acelerador de 5.5 MeV instalado recientemente en el Instituto de Física de la UNAM.

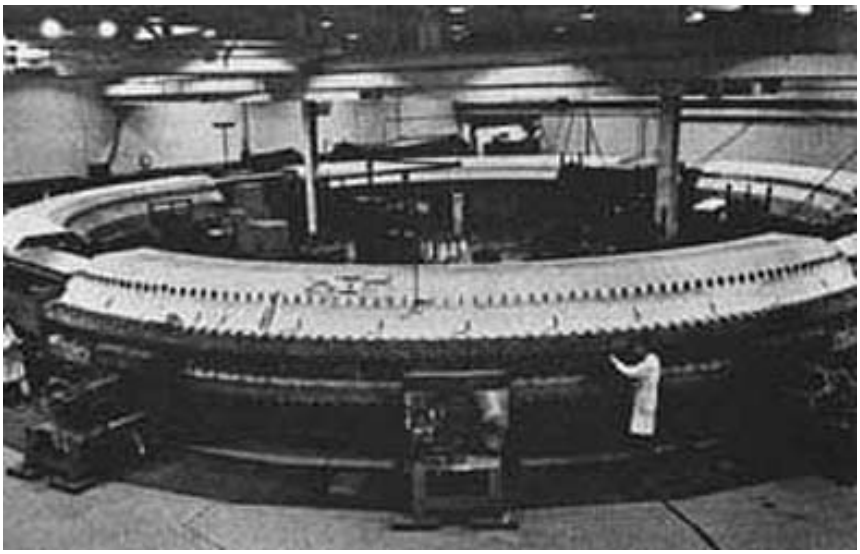
El centro Nuclear de Salazar, Estado de México. Al fondo se aprecia el edificio del acelerador Tandem y los talleres. Al centro, los laboratorios y servicios de cómputo. En primer plano, las oficinas, los cubículos y el auditorio.



Laboratorio del acelerador Tandem Van de Graaff del Centro Nuclear Nacional en Salazar, Estado de México.

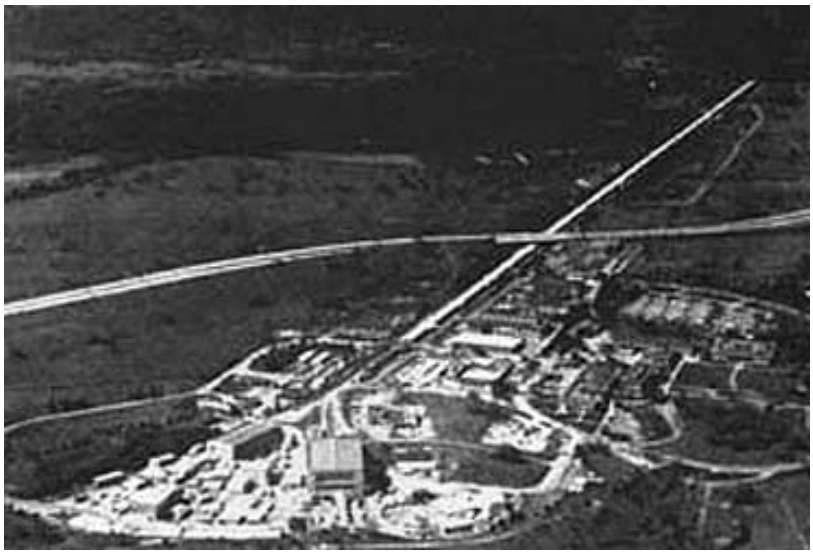


El primer ciclotrón que entró en operación en la Universidad de California en 1932. Este aparato fue diseñado y construido por Lawrence y Livingston.

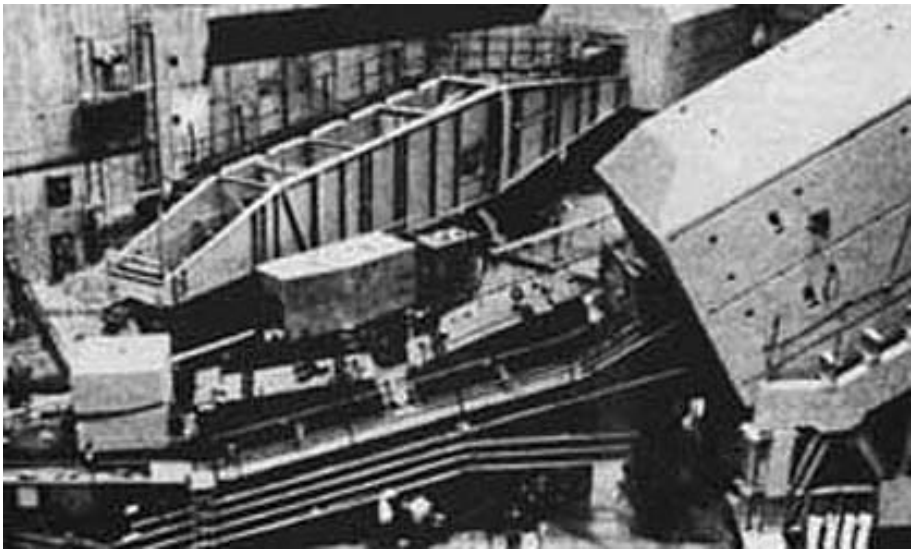


El cosmotrón de 3 GeV de los Laboratorios Nacionales de Brookhaven en Nueva York. La fotografía data de 1954.

El sincrotón de protones de 28 GeV del CERN en Ginebra. Este acelerador operó por primera vez en 1959.



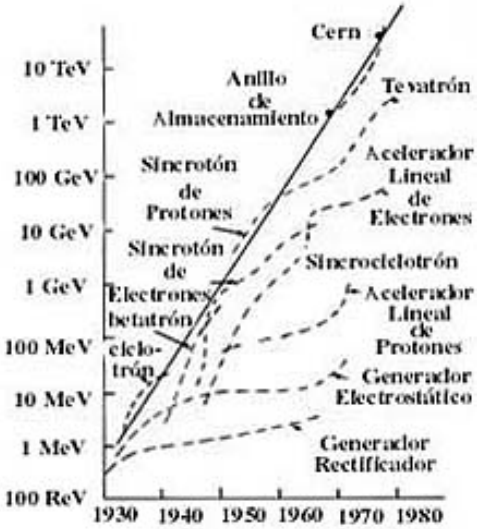
El acelerador lineal de Stanford, que tiene una longitud de 3.2 Kilómetros, puede producir electrones y protones de energía muy alta. En la parte derecha inferior de la fotografía se ve un anillo de almacenamiento, el SPEAR, que tiene unos 75 metros de diámetro.



Una de las áres experimentales del SLAC, el acelerador lineal de Stanford. Aquí se ve uno de los grandes espectrómetros magnéticos.

Vista aerea del acelerador Tevatrón de Fermilab, primera máquina superconductora que entró en operacion. Este es hoy el acelerador de más alta energía en el mundo.

El tunel del acelerador Tevatrón de Fermilab, uno de los laboratorios nacionales de Estados Unidos, tiene una circunferencia de 6.3 Kilómetros. En la fotografía se ven los imanes superconductores que permiten desviar el haz de protones.



Gráfica de Livingston, en la que se muestra como han crecido de manera exponencial los aceleradores de partículas entre 1930 y 1980.

COLOFÓN

Este libro se terminó de imprimir y encuadernar en el mes de agosto de 1995 en Impresora y Encuadernadora Progreso, S. A. de C. V. (IEPSA), Calz. de San Lorenzo, 244; 09830 México, D.F.Se tiraron

2000 ejemplares

la Ciencia desde México es cóordinada editorialmente por MARCO ANTONIO PULIDO Y MARÍA DEL CARMEN FARÍAS.

Indice

CONTRAPORTADA

"El relato que sigue —nos dice el doctor jorge Flores Valdés al referirse al contenido de *La gran ilusión. II*. Los cuarks— es, como gran parte de las investigaciones en el campo de la fisica, una historia de aventuras, el relato de la búsqueda reciente del verdadero átomo, aquel realmente indivisible: el cuark. En el Prólogo en el Cielo del *Fausto*, Goethe hace que Mefistófeles se burle del hombre y de sus actos: 'no hay fruslería donde no meta su nariz.' Esta fruslería es el cuark, de la palabra alemana *quark*, que significa requesón, pero que en el habla popular se usa a veces en el sentido de tontería, o contrasentido."

Hasta donde se sabe, fueron los griegos Demócrito y Epicuro los primeros que intentaron establecer una teoría de las cosas muy pequeñas y así Demócrito, hacia el siglo V a. C., llegó a concebir la materia —con una penetración tan sorprendente que parece un moderno— formada por partículas pequeñísimas que no podían separarse, a las que por eso llamó átomos (en griego = indivisible) que eran eternos, inmodificables, indestructibles: fuera de ellos sólo podría existir el vacío. Su forma sería redonda y lisa en el agua, otros informes que constituirían el fuego y rugosos los de la tierra, eso explicaría, según el griego, sus diferentes propiedades.

Mas donde la concepción de Demócrito alcanza niveles de excelencia es cuando asegura que el movimiento y la manera de comportarse de los átomos están controlados por leyes de la naturaleza que no pueden infringirse. Con tal movimiento no interfieren dioses ni demonios, ellos mismos formados por átomos, y aun el origen de Universo se debe a que un gran número de átomos terminan su movimiento formando mundos.

Si bien la exposición del filósofo tracio es admirable y evoca las teorías modernas sobre el átomo, nos dice el doctor Flores que no debe olvídarse el abismo que la separa de la ciencia moderna: veinticinco siglos de experimentación, de desarrollo matemático y, sobre todo, de cosmovisión. La ciencia actual, aunque aprovecha la introspección y la intuición, cuenta con que sus conclusiones puedan ser comprobadas, el experimento es el juez que decide entre una teoría y otra.

El doctor Jorge Flores Valdés, investigador del IFUNAM, nos cuenta la historia de otra gran ilusión de la física de nuestros días, el cuark, que podría ser el sucesor de los átomos imaginados por los griegos.

Indice