

ELECTRONES, NEUTRINOS Y QUARKS

FRANCISCO J. YNDURÁIN
Real Academia de Ciencias

INTRODUCCIÓN: TAMAÑOS Y ENERGÍAS. ELECTRONES. EL ÁTOMO DE RUTHERFORD; EL NÚCLEO ATÓMICO

Según los griegos, el hombre es la medida de todas las cosas. Diremos, pues, que algo es muy grande si lo es en comparación con nosotros: la tierra, el sistema solar, la galaxia y el mismo universo representan escalas de creciente grandeza. Recíprocamente, si dividimos más y más nuestros constituyentes entraremos en el mundo del microcosmos, que es el que vamos a explorar aquí: aunque en algún momento resultará que ambos mundos, el micro y el macrocosmos aparecerán relacionados.

Un ser humano es en un 80 % agua, H_2O . Si subdividimos esta sustancia, o cualquier otra (como la sal común, $ClNa$) sus propiedades intrínsecas no cambian hasta que llegamos a descubrir que están constituidas por moléculas: si nuestro sentido del gusto estuviera infinitamente afinado, encontraríamos que una molécula de $ClNa$ sigue sabiendo salada.

Para dividir una sustancia hasta el nivel molecular hace falta energía. Para el agua esta energía es la de evaporación, correspondiente a cien grados centígrados. En este punto es conveniente introducir otro tipo de unidad de energía, que es la empleada en el mundo microscópico: es el *electrón-voltio*, abreviado a eV ¹. Es la energía que adquiere un electrón al aplicarle un potencial de un voltio. Dicho así, esto parece muy pequeño: pero no lo es. Si a cada partícula de una sustancia le aplicásemos la energía de un eV , la sustancia adquiriría la temperatura de unos 10.000 grados. Así, la energía de evaporación del agua es el equivalente de una centésima de eV por partícula.

Si queremos romper la molécula, por ejemplo de agua, necesitamos energías aún mayores. Su magnitud aproximada la podemos deducir como sigue: si quemamos hidrógeno, obtenemos temperaturas de cerca de mil grados. Por tanto, para descomponer el agua tendremos que

restituir esta energía: en electrón-voltios, necesitamos una décima de eV . Este es, en efecto, el tipo de voltaje de una corriente eléctrica como la que se utiliza en la descomposición del agua por electrolisis, desde los tiempos de Lavoisier a finales del siglo XVIII. A partir de este momento se identifican, descomponen y combinan la infinita variedad de sustancias presentes en la tierra en términos de unas pocas, que son invariantes bajo estos cambios. Así, si tomamos hidrógeno y lo quemamos en atmósfera de oxígeno, obtendremos agua; y si descomponemos ésta, el oxígeno e hidrógeno resultantes tienen exactamente las mismas propiedades que los iniciales. La combustión y posterior electrolización (si es éste el método que utilizamos para descomponer el agua) no les han afectado. Esto llevó a Dalton, alrededor de 1808, a formular la teoría atómica según la cual todos los elementos están formados por pequeñas unidades. Durante todo el siglo XIX se pensó que por el procedimiento de electrolisis, u otros similares, se podía reducir la materia a *átomos* indivisibles: parecía, pues, que los elementos estuviesen formados de unidades que se combinan unas con otras, pero que no sufren cambios. De hecho, la palabra átomo quiere precisamente decir *indivisible* en griego.

En 1897 J. J. Thomson, en un famoso experimento que discutiremos con algún detalle más adelante, descubrió que la electricidad está formada por el movimiento de partículas elementales, los electrones. Además, identificó a éstos como componentes universales de los átomos: a la vez invalidando una de las ideas de Dalton (los átomos resultaban ser divisibles) pero confirmando la naturaleza eléctrica de los enlaces químicos. En su descubrimiento, que podemos tomar convenientemente como el origen de la investigación moderna en el mundo de lo infinitamente pequeño, utilizó Thomson el tubo de rayos catódicos, artilugio inventado por Crookes algunos años antes.

Aparte de su importancia por otras razones, los experimentos de Thomson son interesantes porque muestran

¹ Además del eV , se utilizan sus múltiplos: el MeV, un millón de electrón-voltios, el GeV, mil millones de eV y, más recientemente, el TeV, un millón de millones de eV .

muy claramente la dependencia mutua de la ciencia y la tecnología. En efecto, durante mucho tiempo Thomson fue incapaz de ver una desviación de los rayos catódicos debido «a la presencia de gas en el tubo (...): era necesario hacer un vacío más perfecto». Pero la técnica de producir vacío estaba en aquel tiempo en un estado rudimentario, y sólo al ser perfeccionada pudo Thomson medir el efecto buscado. Y no sólo dependió el descubrimiento de la mejora en la tecnología del vacío; sino del desarrollo del control de la electricidad sin el que el tubo de Crookes hubiera sido imposible. Esto nos lleva a una breve descripción del tubo, prototipo de tantas otras máquinas (aceleradores de partículas) utilizadas para la exploración del microcosmos.

El tubo de rayos catódicos consta de un recipiente en forma aproximadamente cilíndrica, fabricado en cristal para poder observar lo que ocurre en su interior, donde se ha hecho el vacío. En un extremo se insertan dos cables eléctricos que se conectan, en el interior, por un filamento. Al pasar la corriente el filamento se pone incandescente y los electrones del mismo se desligan de los átomos, formando una nube alrededor del filamento. Podemos ahora acelerar los electrones por medio de un campo eléctrico (estos electrones acelerados forman los *rayos catódicos*), y lanzarlos sobre una placa colocada al otro extremo del tubo donde podemos medir la carga eléctrica depositada por su llegada. Si no hay campos eléctricos o magnéticos en su recorrido, estos electrones impactarán en el centro de la placa; si conectamos un campo se desviarán. Midiendo esta desviación podemos saber las propiedades (carga eléctrica y masa) de las partículas.

La tecnología del tubo de Crookes es, esencialmente, la misma que la de los primeros aceleradores de partículas que se construyeron con este fin específico, el de Cockroft-Walton en Cambridge, Gran Bretaña, (figura 1) y el de Van der Graaf en el M.I.T., operativos a partir de 1933 y capaces de energías de unos pocos millones de electrón-voltios.

Para poder arrancar todos los electrones de los átomos, y por tanto estudiar su estructura, necesitamos al menos una energía igual a la que liga a éstos; energía del orden de diez electrón-voltios, que no estaba disponible hasta principios del siglo XX. A finales del siglo XIX sólo se disponía de energías del orden de unos pocas centésimas de electrón-voltio y, por tanto, la cuestión de la estructura del átomo únicamente se podía plantear de forma especulativa. Esto es algo recurrente, como veremos: la exploración de la estructura de la materia depende crucialmente de la energía de que dispongamos para llevarla a cabo. La única indicación fidedigna que se tenía de la estructura del átomo en la época de Thomson era que es posible arrancar *algunos* electrones de los átomos, luego éstos deben contener electrones. El propio Thomson propuso un modelo del átomo (equivocado) en el que éste contenía una mezcla uniforme de partículas con carga eléctrica negativa, los electrones, y otras con carga positiva, los protones, descubiertos también por aquellas fechas.

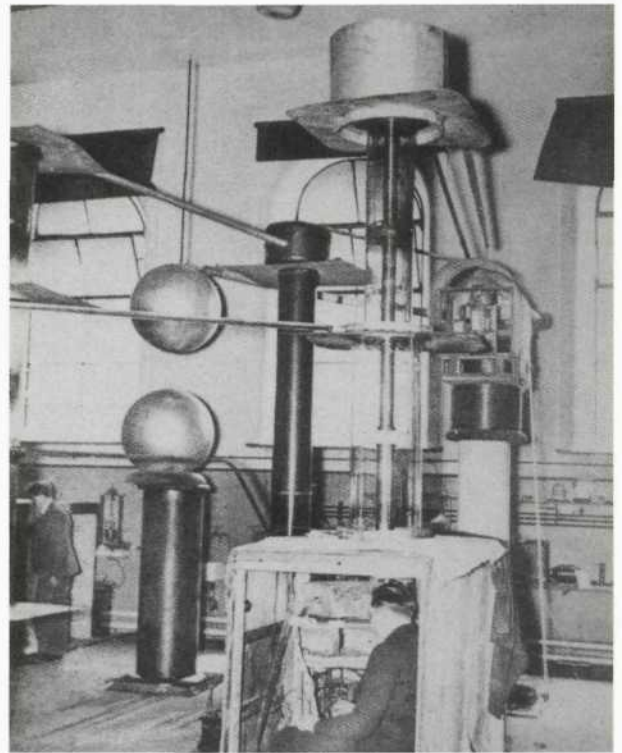


Fig. 1.—Acelerador de Cockroft-Walton. En la «jaula», abajo, Cockroft.

La situación cambió pocos años después. Ciertamente, con la tecnología de la época era poco menos que imposible obtener energías localizadas muy superiores al electrón-voltio; pero en 1896 Becquerel primero y después Pierre y Marie Curie, en 1898, descubrieron que ciertas sustancias naturales (uranio y radio, primeramente, y luego polonio y muchas otras) tienen la propiedad de emitir radiaciones de partículas muy energéticas: de hasta 20 millones de electrón-voltios. La radioactividad natural proporcionó a los científicos de principios de siglo la posibilidad de explorar distancias muy pequeñas, ya que estas radiaciones tenían un gran poder de penetración, de hasta menos de una millonésima de millonésima de centímetro. Lo que fue muy afortunado; no había en el primer tercio de siglo la posibilidad de obtener artificialmente energías como las de las partículas alfa: los 20 *mev* de éstas representan temperaturas muy superiores no sólo a las obtenibles en el laboratorio, sino a las del centro del propio sol, que sólo llegan a 2 *mev*. Y así, Rutherford, en una serie de experimentos brillantes y decisivos, aprovechó la radiación alfa proveniente de desintegraciones del polonio (elemento que producía las partículas más energéticas) lanzándolas sobre distintos blancos. En estos experimentos mostró de manera incontrovertible que el átomo consta de un núcleo con carga positiva, muy pesado y pequeño (unas cien mil veces menor que el átomo) rodeado, a gran distancia relativa, de una nube de electrones.

Los resultados de los experimentos de Rutherford, realizados a partir de 1910, planteaban más problemas de los que resolvían. En primer lugar, ¿de qué estaba hecho

el núcleo? Su masa era, aproximadamente, un múltiplo de la del protón; su carga era también un múltiplo de la del protón: pero ambos números no coincidían. El propio Rutherford, en 1920, sugirió que el núcleo podía contener, además de protones, otras partículas de masa parecida pero sin carga eléctrica. Son los *neutrones*, identificados por Chadwick en 1932.

Por otra parte, y además de la existencia de esta nueva partícula, todos estos resultados implicaban la de unos nuevos tipos de fuerza: los protones del núcleo, al tener toda carga positiva, deberían repelerse, y era necesaria una interacción que compensara esta repulsión. Interacción que, para mantener el núcleo compactado en un espacio tan pequeño, casi una millonésima del tamaño del átomo, debería ser extraordinariamente intensa. Pero además debería tener muy corto alcance, o hubiera sido detectada antes. Y en efecto, Rutherford demostró que cuando los proyectiles pasaban muy cerca del núcleo eran deflectados por una intensa interacción a la que, por este motivo, se denominó interacción fuerte. El segundo tipo de fuerza es la que causa la propia desintegración radioactiva que se ha utilizado para producir los proyectiles. Esta interacción es conocida como *interacción débil* por ser menos intensa que la electromagnética.

La imagen de la estructura microscópica de la materia en el primer tercio del siglo XX. Las moléculas y los átomos, que dominaron la imagen del microcosmos en el siglo XIX, tienen un tamaño de hasta una diezmillonésima de milímetro. En el interior del átomo se encuentra el núcleo, con un diámetro cien mil veces menor, unos 10^{-3} centímetros. Ligados en este minúsculo núcleo atómico teníamos neutrones y protones; y girando a gran distancia de él, una nube de electrones.

ACELERADORES Y RAYOS CÓSMICOS. DETECTORES

La posibilidad de estudiar la estructura de la materia a pequeñas distancias depende de las energías de que dispongamos. Para un primer estudio del átomo bastaron los pocos electrón-voltios del tubo de Crookes; el descubrimiento del núcleo y de su composición en protones y neutrones requirieron energías millones de veces mayores, que se encontraron aprovechando las producidas por la propia naturaleza en sustancias radioactivas. Pero para explorar la posible estructura de protones y neutrones eran necesarias energías mucho mayores. Éstas pueden encontrarse en la naturaleza, entre los rayos cósmicos que, provenientes de no se sabe dónde, nos bombardean continuamente: entre ellos se encuentran de cuando en cuando

algunos de una energía extraordinaria: bastantes de los descubrimientos clave de la física de partículas se realizaron estudiando rayos cósmicos. Pero los rayos cósmicos son erráticos; un estudio sistemático del mundo del microcosmos sólo ha sido posible al controlar nosotros los proyectiles con los que hurgamos en las entrañas de la materia. Efectivamente, el progreso en el estudio de las partículas elementales, y de las fuerzas que actúan entre ellas ha ido parejo con la construcción de aceleradores más y más potentes.

Los primeros aceleradores que se construyeron fueron los citados de Cockroft-Walton y de Van der Graaf. Sin embargo, su método tenía como limitación obvia la de los campos eléctricos que podían crearse. A partir de 1930, y a lo largo de la segunda mitad del siglo, un avance sustancial se dio con el desarrollo de los ciclotrones o sincrotrones; desarrollo en el que fue pionero el americano Ernest Lawrence, que publicó la teoría² de estos artefactos en 1930 y construyó el primero tres años después. En estos aceleradores se hace seguir a las partículas una trayectoria circular (de donde el nombre ciclotrón), por medio de campos magnéticos; dándoles a estas partículas, de forma sincronizada con su paso por puntos fijos de la trayectoria (de donde el nombre sincrotrón), un impulso por medio de campos eléctricos. Desde el primitivo prototipo de Lawrence³ de menos de 27 centímetros, construido en colaboración con su estudiante Stanley Livingstone en 1933, hasta el gigantesco LEP (figura 2), a caballo entre Francia y Suiza, en la proximidad de Ginebra, con más de 27 kilómetros de circunferencia, el principio ha sido esencialmente el mismo⁴. La ventaja de estos aceleradores es que, al pasar una y otra vez las partículas por los puntos en que reciben energía, ésta no está limitada a la que, en un acelerador lineal, recibirían una sola vez.

Es interesante remarcar que, a partir de un cierto momento, los aceleradores más potentes son los llamados colisionadores en los que partículas de cargas eléctricas opuestas, tales como protones y antiprotones, electrones y positrones o, en el caso de HERA, electrones y protones, se hacen girar en sentidos opuestos en el interior del acelerador de manera que colisionen de frente. (En unos pocos casos las partículas que se hacen colisionar tienen la misma carga eléctrica). Debido a las peculiaridades de la cinemática relativista esto no duplica la energía de colisión, sino que, *grosso modo*, podemos decir que la eleva al cuadrado (medida en GeV). A cambio, el delicado ajuste que implica hacer chocar a dos chorros de partículas que se mueven casi a la velocidad de la luz hace a estos aceleradores menos precisos que aquellos en los que las partícu-

² De hecho, los conceptos habían sido ya discutidos por el noruego Rolf Widerøe en 1923-1925.

³ Los Estados Unidos llevaron durante bastante tiempo la delantera en la construcción de aceleradores; pero a partir de la puesta en funcionamiento del CERN (laboratorio europeo de física de partículas) a finales de los años cincuenta, Europa se puso, más o menos, al mismo nivel. Fuera de Europa, sólo en la antigua Unión Soviética y en Japón se han construido artilugios comparables.

⁴ Algunos, pocos, de los aceleradores construidos modernamente son *lineales*, recibiendo las partículas aceleraciones en diversos puntos a lo largo de la trayectoria en línea recta.



Fig. 2.— Acelerador LEP (*Large Electron Positron collider*). La estructura en forma de horquilla en la parte baja es el aeropuerto internacional de Ginebra.

las, una vez aceleradas, se hacen chocar con un blanco fijo: de forma que prácticamente todas producen interacción.

En la actualidad los aceleradores de partículas están llegando a su techo. Los mayores del mundo, HERA, en Hamburgo, Fermilab, cerca de Chicago y CERN, a caballo en la frontera franco-suiza en las inmediaciones de Ginebra, son excesivamente grandes: los 27 kilómetros del de mayor tamaño, el LEP, serán difíciles de superar. También son, por supuesto, demasiado costosos, del orden de muchos miles de millones de dólares; y requieren demasiada mano de obra, miles de personas entre científicos e ingenieros. Finalmente, el *tempo* de su construcción es excesivamente largo; desde que se comenzaron en serio los estudios para el último behemot, el LHC (de sus iniciales en inglés, Large Hadron Collider), y su esperada puesta en marcha (prevista entre el 2005 y el 2007) van a transcurrir casi veinte años, y eso que el LHC aprovecha toda la infraestructura del LEP. Salvo que se descubran métodos radicalmente nuevos de aceleración de partículas tendremos que volver a los rayos cósmicos que, de cuando en cuando, proporcionan partículas de energías hasta cien veces las del LHC. Pero, desgraciadamente, el número de éstos es tan pequeño que no es fácil imaginar cómo pue-

den utilizarse para una investigación sistemática. Parece que la exploración de la estructura última de la materia está tocando a su fin, al menos en lo que se refiere a su vertiente experimental.

Pasamos ahora a una breve descripción de los detectores utilizados en la búsqueda de partículas y fuerzas fundamentales. En efecto, no basta con romper átomos, núcleos o protones: es necesario además detectar los productos de esta ruptura e identificar y analizar lo detectado. En el siglo XIX, y durante una buena parte del principio del XX, los detectores eran esencialmente placas o emulsiones fotográficas; pero a finales del siglo XIX y, sobre todo, en el actual a partir de los años cuarenta y cincuenta, se desarrollaron detectores específicamente para la tarea de investigar partículas que se mueven con unas energías tremendas. Uno de los primeros tipos de detectores fueron las cámaras de niebla⁵. En éstas se encierra en una cámara vapor sobresaturado; al pasar una partícula, pequeñas gotas de agua (niebla) se condensan a lo largo de su trayectoria; estela que se fotografía, y después analiza para inferir las propiedades de las partículas que dejaron el rastro. Un mecanismo parecido es el de las cámaras de burbujas. Aquí, en lugar de un vapor saturado se utiliza un líquido sobrecalentado; el paso de la partícula produce

⁵ Inventadas por C. R. T. Wilson a partir de estudios comenzados en 1895 y llevados a buen fin en 1911 y perfeccionados por él mismo y otros en los años treinta.

pequeñas burbujas que se alinean también a lo largo de su trayectoria.

El último método ha sido, durante muchos años, el más eficaz. Esto impulsó la construcción de cámaras de burbujas cada vez más grandes hasta llegar a una de las de mayor tamaño, la llamada Gargamelle (en honor de la madre del personaje del cuento de Rabelais, *Gargantúa*), un cilindro de casi dos por cinco metros relleno de 18 toneladas de líquido (freón) que, todavía en el año 1973, fue instrumental en realizar el descubrimiento de las llamadas corrientes neutras y, con ellas, indirectamente de la partícula Z, confirmando las modernas teorías de interacciones débiles.

Pero ya en esa época las necesidades de detección de partículas habían llevado al desarrollo de otros métodos en los que las trayectorias se reconstruyesen electrónicamente: son los contadores (basados en principios similares a los de los conocidos contadores Geiger), las cámaras de chispas, en las que el paso de partículas cargadas eléctricamente produce chispas al pasar entre placas cargadas eléctricamente, los contadores Cerenkov, fototubos y un largo etcétera⁶. El tamaño de los detectores también ha ido creciendo; muchos de los utilizados en el acelerador LEP, en el CERN, y los que se emplean en HERA (como el mostrado en la figura 3), o Fermilab son mayores que un edificio de tres plantas. El tamaño de los grupos de investigadores necesarios para construir y manejar semejantes ingenios también ha ido creciendo, así como han ido creciendo el número de países involucrados en cada experimento: los experimentos de LEP, HERA o Fermilab se llevan a cabo por colaboraciones con varios cientos de participantes, representando países de toda Europa más americanos, japoneses, chinos, etc. La ciencia tiene fama de ser internacional, y la física de partículas lleva esto a sus últimas consecuencias.

En los detectores que hemos mencionado hasta ahora las partículas se identifican individualmente; en otros únicamente registramos la energía que llevaban las partículas que les golpean, como los detectores calorimétricos, en los que se mide la cantidad de calor depositada por los choques de las partículas que llegan a ellos. Obviamente menos finos que los anteriores, estos detectores tienen ventajas complementarias, tales como ser sensibles a todo tipo de partículas: la mayor parte de los otros detectores sólo registran partículas con carga eléctrica. En cierto sentido, son complementarios a los anteriores, y de hecho se utilizan muchas veces acoplados. En la figura 4 se muestra un ejemplo de la imagen, reconstruida por ordenador, de una interacción.

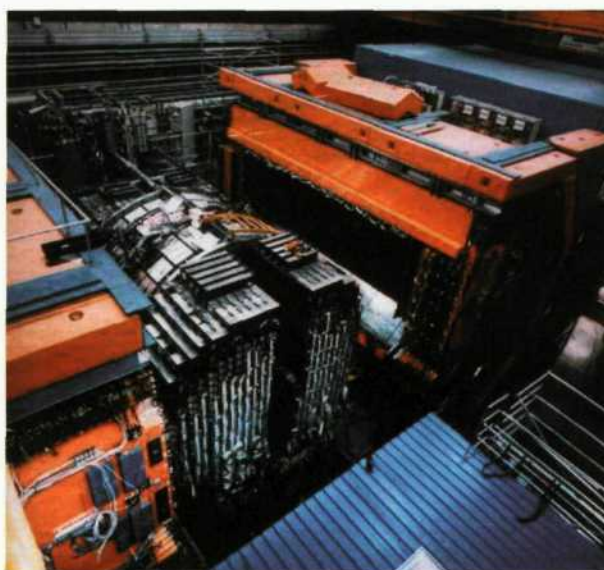


Fig. 3.— El detector llamado Zeus, que opera en el acelerador HERA, en Hamburgo, y en cuya construcción participaron científicos españoles del grupo de la Universidad Autónoma de Madrid. El detector está abierto para mantenimiento; su tamaño es el de una casa de tres pisos.

INTERACCIONES Y PARTÍCULAS

Así como el siglo XVII vio el desarrollo de la mecánica clásica por Galileo y Newton, y el XIX la teoría clásica del electromagnetismo por Maxwell y otros, las bases de la física en el siglo XX son la relatividad y la mecánica cuántica. Sin ellas hubiese sido imposible el progreso, no sólo en la comprensión de la naturaleza a escala microscópica, sino de una buena parte de los fenómenos cuya aplicación ha cambiado la sociedad en los últimos años: ordenadores, televisores o centrales nucleares constituyen algunos ejemplos familiares a todos. No podemos ahora presentar una descripción detallada de relatividad o mecánica cuántica, pero sí es necesario hacer hincapié en que cualquier discusión de la física del microcosmos las presupone.

La relatividad y la mecánica cuántica describen el marco en el que actúan las distintas interacciones que operan en el universo; un problema distinto es el de la naturaleza de dichas interacciones. Para obtener una imagen del universo no basta con saber que cualquier interacción debe ser invariante relativista, y debe obedecer las leyes de la mecánica cuántica: es necesario determinar qué interacciones específicas utiliza la naturaleza, y cómo ac-

⁶ Un problema nada trivial es el de análisis de las imágenes que proporcionan los detectores. A las tremendas energías de los grandes aceleradores actuales, las brutales colisiones producen chorros de partículas, siendo el número de éstas de docenas e incluso centenares. Los métodos de tratamiento informático de señales han sido esenciales en la identificación de los productos de las colisiones ultraenergéticas, de manera que no es sorprendente que hayan exigido un importante desarrollo de la informática en los laboratorios de física de partículas. Hasta tal punto que la industria noruega de microprocesadores, durante un tiempo líder mundial, se desarrolló en colaboración con el CERN. Fueron también científicos de este organismo (en particular T. Berners-Lee) los que, motivados por la necesidad de transmitir datos e información entre miembros de colaboraciones científicas desparramados por Europa, desarrollaron, a finales de los años ochenta, la transmisión de información en hipertexto, poniendo en marcha la World Wide Web (Internet). Dos bonitos ejemplos de cómo la investigación básica produce *spin-offs* en tecnología de punta.

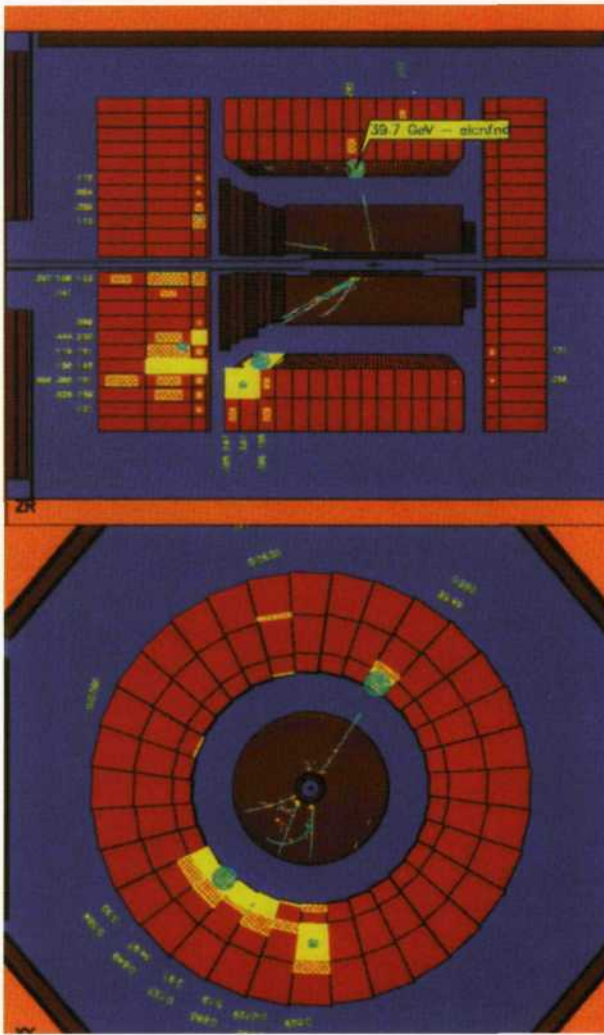


Fig. 4.— Trazas de partículas registradas en el detector Zeus, localizado en el acelerador HERA. Vista lateral (arriba) y central (abajo). Las manchas amarillas en el anillo exterior representan la cantidad de calor depositado por las partículas que llegan allí: el detector es de tipo mixto, incluyendo detector de trazas y calorímetro.

túan. Cuando describimos los experimentos de Rutherford indicamos que éstos no sólo determinaron la estructura del átomo, sino que revelaron la existencia de una fuerza que actúa entre neutrones y protones (pero no en los electrones), mucho más intensa que la electromagnética, y que por esto se conoce como «interacción fuerte», y a las partículas que la experimentan como *hadrones* (del griego *adros*, 'fuerte'). También mencionamos que el descubrimiento de la radioactividad implicó la identificación de un tipo de fuerzas mucho menos intensas que las electromagnéticas (y a las que, con evidente falta de imaginación, se ha bautizado como interacciones débiles) responsables de las desintegraciones, en especial de la desintegración llamada «beta». Junto con la electromagnética y la familiar interacción gravitatoria tenemos, pues, un cuarteto de fuerzas: y podemos decir que su desentrañamiento equivale a una comprensión, al menos en principio, de todos los fenómenos observados en el micro-

cosmos. Este fue el problema que se les planteó a los físicos al final del primer tercio del siglo XX.

El problema está lejos de ser trivial. La estructura de las fuerzas más familiares, las electromagnéticas, se determinó bastante pronto; ya en 1927 Dirac realizó los primeros cálculos, teniendo en cuenta la mecánica cuántica, de interacción de la radiación con la materia, y en los años cuarenta y cincuenta, gracias a los trabajos de, entre otros, Schwinger y Feynman, se construyó una teoría (electrodinámica cuántica) perfectamente compatible con los principios básicos de la relatividad y la mecánica cuántica y con una capacidad predictiva impresionante. No podemos aquí presentar unas explicaciones detalladas sobre los tests de precisión de la electrodinámica cuántica, precisión que ha sido calificada de «inhumana» por John Horgan. En efecto, el acuerdo entre teoría y experimento llega hasta diez y doce cifras decimales en experimentos a baja energía, y hasta cuatro en los de precisión llevados a cabo en el acelerador LEP, con energías de hasta los doscientos mil millones de electrón-voltios.

Las interacciones débiles y las interacciones fuertes tardaron bastante más en ser comprendidas. La razón, indudablemente, es que al ser interacciones de corto alcance sólo se manifiestan directamente en el mundo subatómico. Por lo tanto, y a diferencia del electromagnetismo, no partíamos de una teoría clásica bien establecida, de manera que se tuvo que construir, desde el principio, una teoría cuántica y relativista de ambas interacciones. De hecho hubo que esperar a los años 1971-1973 para encontrar las teorías correctas y completas. En estos años se produjeron, primero, la demostración por el holandés Gerhard 't Hooft, culminando trabajos comenzados por el también holandés Martinus Veltman, de la autoconsistencia (llamada, por motivos técnicos, renormalizabilidad) de las teorías propuestas fenomenológicamente por Glashow, Weinberg y Salam para interacciones débiles; y, segundo, el descubrimiento de la propiedad de libertad asintótica (Gross, Wilczek y Politzer) de las interacciones fuertes. Estos avances hicieron posible obtener teorías consistentes con la relatividad y mecánica cuántica de ambos tipos de interacciones; teorías que, además, han superado con éxito las muy abundantes confrontaciones experimentales realizadas hasta la fecha.

En las interacciones fuertes y débiles no se llega a los extremos de precisión que hemos llegado para las interacciones electromagnéticas. Por una parte, los experimentos son mucho más difíciles ya que han de realizarse sobre interacciones que tienen muy corto alcance: una billonésima (billón español, un millón de millones) de milímetro, y las débiles todavía unas mil veces menos. De manera que son necesarios experimentos a enormes energías, necesariamente poco controlables. En el caso de las interacciones fuertes tenemos además el fenómeno del confinamiento que dificulta cálculos muy precisos ya que, debido a él, los quarks nunca pueden estudiarse aislados, e incluso el vacío tiene una compleja estructura. De hecho lo que es realmente impresionante, constituyendo un auténtico *tour de force*, es que hayamos sido capaces de des-

cifrar estas interacciones, y de realizar medidas acerca de ellas. Sin embargo, y a pesar de su dificultad, se han conseguido precisiones notables: en las interacciones débiles, llegamos a errores de menos del uno por mil en la predicción de resultados experimentales; y en las interacciones fuertes estamos llegando al uno por ciento.

No vamos a presentar aquí una lista pormenorizada de las comprobaciones experimentales de nuestras teorías actuales de interacciones débiles y fuertes, que llenarían un volumen entero; pero sí presentaremos una breve historia de la génesis de las primeras. Y ello debido a que su culminación ha sido objeto del último premio Nobel en Física, en 1999.

Fue Fermi el primero en proponer, en 1932, una teoría de las interacciones débiles, en particular del proceso de desintegración radioactiva. En lenguaje moderno diríamos que un quark de tipo *d* en el interior de uno de los neutrones del núcleo que se desintegra se convierte en un quark de tipo *u*, emitiendo un electrón y un neutrino. En la teoría de Fermi la interacción sólo tenía lugar si las cuatro partículas, *d*, *u*, *e* y neutrino, se encontraban en el mismo punto. En esto se diferenciaba de la interacción electromagnética, mediada por el intercambio de fotones a distancias finitas.

La teoría de Fermi tuvo inmediatamente éxito a la hora de describir las interacciones débiles, con tal de que se hiciesen los cálculos sólo en primera aproximación. Si se calculaban efectos de orden superior, tal y como relatividad y mecánica cuántica requieren, se encontraban resultados absurdos (infinitos). Muchos métodos se intentaron para resolver este problema. El que a la postre resultó ir en la dirección correcta fue formulado en 1961 por Glashow, suponiendo que las interacciones débiles son mediadas por partículas *W* y *Z*. Para estar de acuerdo con los resultados experimentales, Glashow reconoció que tenían que tener estas partículas unas enormes masas, docenas de veces mayores que el protón (como hoy sabemos, la *W* unas noventa veces y la *Z* casi cien). Pero esto es, en principio, un desastre; debido a que las partículas *W*, *Z* tienen autointeracciones, la teoría sólo puede ser consistente si su masa es cero, como habían demostrado ya en 1954 Yang y Mills.

La solución al problema comenzó a encontrarse por (entre otros) Higgs. Consiste en imaginar que el vacío está lleno (!) de un campo, que en su honor se conoce hoy como campo o partícula de Higgs. En su modelo no todas las partículas interactúan con ese campo; las que lo hacen adquieren algo indistinguible de la masa, ya que al moverse en el vacío ocupado por el campo de Higgs tienen que arrastrarlo. Weinberg e, independientemente, Salam y Ward, se dieron cuenta de que se podía salvar el modelo de Glashow suponiendo que las partículas *W* y *Z* no tienen masa por sí, sino sólo como reflejo de su interacción con el vacío de Higgs. El artículo de Weinberg es de 1967; pero

durante los cuatro años siguientes no se tomó en serio. La razón es que nadie era capaz de realizar con él cálculos más allá de la primera aproximación: si se intentaban hacer de forma *naïf*, se obtenían resultados indeterminados.

La situación cambió dramáticamente a partir de 1971-1972 cuando 't Hooft, culminando los trabajos que Veltman llevaba realizando en los años anteriores, demostró que el modelo de Glashow-Weinberg-Salam era, efectivamente, consistente. Posteriormente en un artículo conjunto 't Hooft y Veltman introdujeron un método de cálculo, llamado de regularización dimensional (que consiste en trabajar *como si* las dimensiones del espacio no fuesen un número entero). Este método⁷ permitía realizar con relativa sencillez evaluaciones en cualquier orden de aproximación. Los resultados mencionados conmocionaron a la comunidad científica. Los teóricos se lanzaron a realizar cálculos, cada vez más exactos; y los físicos experimentales, contagiados de este entusiasmo, realizaron los muy difíciles experimentos que eran necesarios para comprobar la predicción más novedosa de la teoría, la existencia de interacciones débiles sin intercambio de carga eléctrica (conocidas por este motivo como *corrientes neutras*). Interacciones que fueron efectivamente descubiertas en 1973 en el laboratorio europeo de física de partículas (CERN).

A partir de 1987 se puso en marcha en el CERN, en Ginebra, el acelerador LEP (un colisionador de electrones y positrones; LEP son las iniciales de *Large Electron-Positron collider*), el mayor acelerador construido hasta la fecha. Éste es un acelerador extraordinariamente limpio; al ser los proyectiles partículas elementales, no se producen los desechos típicos de los colisionadores de partículas compuestas (como los protones). Con él se podían medir con gran precisión, hasta cuatro cifras decimales, las propiedades de las partículas *Z*; por ejemplo, su masa. El valor obtenido para la masa (suele citarse el producto $M_Z c^2$, $M_Z c^2 = 91\,187\text{ MeV}$, con un error de 7 MeV) era tal que, al comparar con los cálculos teóricos resultaba una pequeña discrepancia, que inmediatamente se interpretó como debida a no haber tenido en cuenta los cálculos teóricos la existencia del quark *t*⁸. Realizados los cálculos teóricos se obtuvo que el acuerdo con las medidas de LEP sólo era posible si el quark *t* tenía una gran masa, del orden de 180 veces la masa del protón.

La demostración más impactante de la utilidad de los métodos de 't Hooft y Veltman, y de la capacidad predictiva de la teoría de las interacciones débiles probablemente sea la del descubrimiento del quark *t*. Porque, efectivamente, este quark fue encontrado en 1995-1996 en el laboratorio de Fermilab, cerca de Chicago, con la masa y las propiedades predichas por la teoría. Es muy probable que sea este éxito de los cálculos de precisión posibilitados por los métodos de 't Hooft y Veltman lo que ha mo-

⁷ De hecho, descubierto independientemente e incluso algo antes por los argentinos Bollini y Giambiagi.

⁸ La posible existencia de un sexto quark, el *t*, había sido sugerida por la teoría por otros motivos desde más de diez años antes.

vido al Comité Nobel a (¡por fin!) concederles el premio en 1999.

La única cenicienta, en lo que se refiere a la comprensión de la estructura microscópica de las interacciones, es la interacción gravitatoria: curiosamente la que conocemos desde hace más tiempo. Aunque tenemos una teoría extraordinariamente exitosa de la interacción gravitatoria a nivel macroscópico (la teoría de la relatividad general de Einstein) lo cierto es que no hemos sido capaces de construir una teoría microscópica de la gravedad, y aún hoy no sabemos si la teoría de Einstein es compatible con la mecánica cuántica. Esto es así, indudablemente, por una falta total de información experimental sobre la interacción gravitatoria a cortas distancias. Lo más que hemos llegado son a los experimentos del tipo del realizado por Eötvös, midiendo la interacción gravitatoria entre dos cuerpos a unos pocos centímetros: la interacción gravitatoria entre partículas elementales (quarks, electrones o incluso núcleos) es tan minúscula que no hay esperanzas de que pueda ser medida, ni en la actualidad ni en el futuro previsible. Y sin información experimental no hay física sólida, sino especulaciones más o menos ilustradas; de algunas de ellas hablaremos al final de este artículo.

ELECTRONES, NEUTRINOS Y QUARKS. «FAMILIAS» DE PARTÍCULAS

Toda la materia del universo está formada por agregados de tres tipos de partículas elementales: electrones, neutrinos y quarks, o por los *quanta* de radiación de los campos correspondientes a las fuerzas que actúan en ellas (interacciones electromagnéticas, débiles, fuertes y gravitatorias).

En primer lugar, tenemos los cuatro constituyentes fundamentales de la materia que nos rodea, representados en la tabla adjunta. Con la excepción de algún raro rayo cósmico y de ocasionales neutrinos de tipo *mu* o *tau*, la tierra y el sol, los planetas y las estrellas, hasta las más alejadas galaxias, están compuestas de electrones, neutrinos y quarks de los tipos *u* y *d*. En la tabla I presentamos los símbolos bajo los que se conocen a las partículas seguidas de sus cargas eléctricas, en unidades de la carga del protón.

A estos constituyentes pueden añadirse fotones y gluones⁹, así como las partículas *Z* y *W* que intermedian las interacciones débiles: partículas todas éstas que a veces no son consideradas como «ladrillos» sino como «cemento» en la constitución de la materia.

La identificación de los componentes últimos de la materia no fue sencilla. Después del descubrimiento del electrón por Thompson, que ya citamos, llegó el del núcleo ató-

Tabla I. Símbolos bajo los que se conocen a las partículas seguidas de sus cargas eléctricas, denotadas por el símbolo *Q*, en unidades de la carga del protón

<i>e</i> ; $Q_e = -1$
ν_e ; $Q_\nu = 0$
<i>d</i> ; $Q_d = -1/3$
<i>u</i> ; $Q_u = 2/3$

mico por Rutherford y la identificación de protones y neutrones como constituyentes de estos núcleos. Como ya hemos mencionado, en los años treinta y cuarenta se había establecido que todos los núcleos están compuestos por dichas partículas; desde el más sencillo, el de hidrógeno con un solo protón, hasta el más complejo de los que se encuentran en la naturaleza, el de uranio con 92 protones y ciento y pico neutrones. Parecía, pues, que protones y neutrones fuesen los últimos constituyentes de la materia nuclear, y que para entenderla sólo hiciese falta una teoría de sus interacciones. Pero en los años cincuenta, con el advenimiento de los potentes aceleradores de partículas, capaces de energías de miles de millones de electrón-voltios, pudo explorarse el interior de protones y neutrones, en una serie de cruciales experimentos realizados por Hofstadter en Estados Unidos. La conclusión de estos experimentos fue que ambas partículas presentan estructura; algo que Gell-Mann, en 1964, explicó suponiendo que tanto neutrones como protones están formados por unas partículas más elementales, los quarks, de los que en neutrón y protón se encuentran de dos tipos, denominados convencionalmente *u* y *d*. En la época en que Gell-Mann hizo su hipótesis se sabía que existe otro tipo de quark, el quark *s*; y en tiempos posteriores se han descubierto otros tres tipos de quarks, el *c* (en 1974), el *b* en 1977 y el *t* en 1997, estos tres predichos por consideraciones teóricas antes de ser encontrados experimentalmente. Por consideraciones teóricas sabemos también que no hay más tipos de quark que los seis que hemos mencionado.

A finales del siglo XIX Becquerel había descubierto la radiactividad natural, y con ella la tercera fuerza que opera en el mundo microscópico, la interacción débil que ya hemos mencionado. El típico proceso de esta interacción era la desintegración conocida como desintegración beta, en que un neutrón de un núcleo se desintegraba emitiendo rayos beta (de hecho, como se identificó bastante pronto, formados por electrones) y convirtiéndose en un protón; véase la figura 5. Pero del estudio de esta reacción se seguía una desconcertante paradoja: la energía del estado inicial era superior a la de los productos de la desin-

⁹ Los *gluones* son los *quanta* de las interacciones fuertes. Son partículas sin masa, poseen autointeracciones, y están confinadas (como los quarks). Fueron postuladas a principios de los años setenta, y detectadas indirectamente a finales de esta década. También a finales de la década se obtuvo evidencia experimental directa de su existencia, en primer lugar en el acelerador PETRA en Hamburgo.

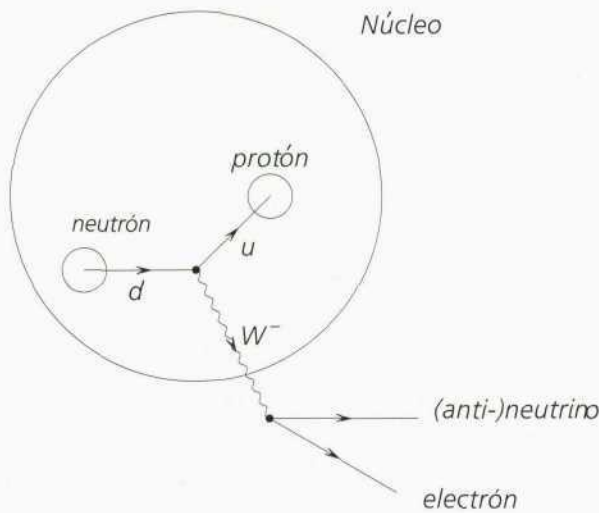


Fig. 5.— Esquema de la desintegración beta. El núcleo resultante es inestable, y se rompe (fisión natural) emitiendo, en general, partículas alfa y energía suplementaria en forma de radiación electromagnética (rayos g).

tegración. Esta paradoja era un desastre: aparentemente ponía en cuestión la ley de conservación de la energía, uno de los pilares sobre los que se asentaba todo el edificio de la física. Durante un cierto tiempo pareció incluso que hubiese que abandonar esta ley; pero en 1930, en una famosa carta que el físico alemán Wolfgang Pauli dirigió al congreso de radioactividad celebrado en Tubinga, éste dio cuenta de que el principio de conservación de la energía podía salvarse si se suponía que, junto con electrón y protón, el producto de la desintegración contenía una partícula de masa muy pequeña o nula, eléctricamente neutra y que sólo interaccionase débilmente; partícula conocida con el nombre que le dio Fermi de *neutrino*.

Posteriormente, los neutrinos han sido detectados de forma directa e incluso hemos llegado a poderlos utilizar como proyectiles para con ellos (aprovechando la debilidad de su interacción) penetrar en el interior de otras partículas. No sólo eso; los modernos detectores de neutrinos, aparatos masivos de muchas toneladas de peso, son sensibles a los neutrinos procedentes de los procesos nucleares que se llevan a cabo en el sol, y que proporcionan su energía. Incluso, cuando en 1987 se produjo la explosión de una supernova en una de las nubes de Magallanes (galaxias situadas en la vecindad de nuestra Vía Láctea a 170.000 años luz de nosotros), algunos detectores pudieron identificar el paso de los neutrinos producidos en la colosal detonación.

Con estas partículas e interacciones somos capaces de explicar el mundo que nos rodea; desde los enlaces químicos, y la estructura del átomo, hasta, como hemos visto en el caso de los neutrinos, las reacciones que mantienen el sol brillando o las que provocan la explosión de una supernova. Pero las cosas no acaban aquí; la naturaleza presenta un hecho extraordinariamente curioso, cuya explicación se nos escapa completamente; y es que, por cada una de las partículas mencionadas en la tabla 1, existen otras dos con propiedades idénticas excepto por la masa, que es muy supe-

rior. Estas partículas se desintegran rápidamente y, por ser muy masivas (excepto los neutrinos), sólo pueden crearse a las enormes energías disponibles en los grandes aceleradores actuales, o en rayos cósmicos excepcionalmente energéticos. Así, la tabla 1 debe completarse con otras dos listas de partículas pesadas, quedando el elenco de partículas elementales como aparece en la tabla II. La historia, aparentemente, termina aquí. La precisión de las medidas experimentales, en especial en LEP, y de los correspondientes cálculos teóricos, nos permiten, con un buen grado de certidumbre, saber que no hay más familias que las que ahora conocemos, pues hubiesen producido efectos similares a los que indicaron la existencia del quark *t*.

Tabla II. Todas las partículas elementales, agrupadas en «familias». Las partículas de la primera familia (primera fila) constituyen prácticamente todo el Universo; la única utilidad de las partículas de la segunda y tercera familias parece ser proporcionar trabajo a los físicos de altas energías

$e; Q_e = -1$	$\mu; Q_\mu = -1$	$\tau; Q_\tau = -1$
$\nu_e; Q_\nu = 0$	$\nu_\mu; Q_\nu, \mu = 0$	$\nu_\tau; Q_\nu, \tau = 0$
$d; Q_d = -\frac{1}{3}$	$s; Q_s = -\frac{1}{3}$	$b; Q_b = -\frac{1}{3}$
$u; Q_u = \frac{2}{3}$	$c; Q_c = \frac{2}{3}$	$t; Q_t = \frac{2}{3}$

El hecho de que, aparte de su masa, las partículas *mu* (o *muones*) y *tau* tengan propiedades idénticas al electrón ha hecho que a veces se las conozca como «electrones pesados». Globalmente, se conoce a electrones (ligeros o pesados) y neutrinos como *leptones*, por ser más ligeros que los quarks; a los quarks, y a las partículas compuestas de ellos, se las conoce como hadrones por participar en las interacciones fuertes. Un caso también sorprendente es el de los neutrinos: no sólo se han detectado, sino que sabemos que existen de tres tipos distintos: neutrinos electrónicos, neutrinos muónicos y neutrinos tauónicos que sólo se diferencian en que cada uno acompaña, en la interacción débil, al leptón (electrón, mu o tau) correspondiente y, tal vez, en una minúscula diferencia de masas. La historia del descubrimiento de todas estas partículas forma uno de los capítulos más apasionantes del desarrollo de la ciencia en los últimos cincuenta o sesenta años. Unas veces yendo por delante el experimento (al principio) y otras la teoría (a partir de los años 1971-1973, al establecerse las teorías de interacciones débiles y fuertes) ha sido necesaria una enorme inventiva, y unos impresionantes desarrollos tecnológicos, para desenmarañar el rompecabezas del mundo subnuclear.

MÁS ALLÁ DEL MODELO ESTÁNDAR. INTERACCIÓN GRAVITATORIA. EL MECANISMO DE HIGGS

Podemos decir que, a partir de 1971-1973, años en que se propusieron las teorías correctas de interacciones débiles y fuertes, y culminando en 1982, en que se descubrieron (con todas las propiedades predichas por la teoría) las partículas intermediadoras de la interacción débil, las

W y Z, tenemos una descripción sencilla y coherente de la materia. Sin embargo, casi desde el principio, desde ya 1973-1975, comenzaron intentos por ir más allá del modelo estándar. Intentos que, hasta hoy, se han saldado con un fracaso: a pesar de lo cual vamos a discutir brevemente algunos de los más interesantes puesto que, aún sin éxito por el momento, pueden tal vez formar la base de la física de partículas en el siglo XXI.

Comenzamos por las llamadas «teorías de gran unificación». A mediados de los años setenta Pati y Salam y, especialmente, Georgi y Glashow, construyeron modelos en los que las tres fuerzas (débiles, electromagnéticas y fuertes) se unificaban en una *única* interacción; y las cuatro partículas (quarks *u*, *d*, electrón y neutrino electrónico) resultaban ser diferentes estados de una *única* partícula elemental. Tales teorías tenían además otras importantes consecuencias. En primer lugar, explicaban por qué todas las cargas son múltiplos enteros de la del quark *d* ($1/3$ de la del electrón). En segundo lugar, eliminaban los problemas de autoconsistencia de la electrodinámica cuántica. En tercer lugar, la intensidad relativa de las fuerzas resultaba una *predicción* de la teoría, predicción que estaba de acuerdo con los resultados experimentales, dentro de la precisión alcanzable en los años setenta-ochoenta. Finalmente, la gran unificación implicaba que el protón tenía que ser inestable, siendo su tiempo de desintegración de 10^{30} años. Esta predicción tenía importantes consecuencias cosmológicas ya que ofrecía una posible explicación de la aparición de la materia en el Big Bang, a partir de energía pura, por el proceso inverso al de desintegración.

Las teorías de gran unificación tuvieron gran auge durante un tiempo; pero cayeron en un cierto descrédito en los años ochenta, y esto debido a las siguientes razones. Los experimentos realizados en tres o cuatro laboratorios del mundo para intentar encontrar la desintegración del protón no dieron fruto, llegándose en 1983 a establecer la vida media del protón como superior a 10^{33} años, decididamente incompatible con los modelos de gran unificación. Sin embargo, los experimentos no resultaron inútiles; no detectaron la desintegración del protón, pero sí los neutrinos producidos por la explosión de una supernova en las nubes de Magallanes, en el año 1987, y que ya mencionamos. Además, al realizarse medidas más y más precisas, se vio que las relaciones implicadas por los modelos de gran unificación para las intensidades de las interacciones no se cumplían con la exactitud esperada. Finalmente, tenían las teorías de gran unificación problemas de consistencia (las llamadas jerarquías, de carácter bastante técnico y que no discutiremos).

El segundo tipo de extensiones ensayadas fueron las teorías supersimétricas, introducidas por Julius Wess y Bruno Zumino a principios de los setenta. En estas teorías lo que se unifican son las partículas y las fuerzas. Es decir, si funcionasen realmente las teorías supersimétricas, los quarks, electrón y neutrino, por una parte; y los fotones, gluón y partículas W, Z por otra, serían, sim-

plemente, distintos estados de un único objeto fundamental. Pero las teorías supersimétricas adolecen de dos defectos, en mi opinión casi definitivos. En primer lugar, la idea de unificar las partículas y las fuerzas *conocidas* no funciona. Es necesario suponer la existencia de hasta ahora inobservadas fuerzas y partículas complementarias (conocidas en la jerga del oficio como *compañeros supersimétricos*), a las que hay que dotar de unas masas enormes para explicar su ausencia en los experimentos realizados con los aceleradores construidos hasta la fecha. En segundo lugar, todos los modelos concretos que se han construido de supersimetría, en los que se hacía predicciones sobre las masas de los compañeros supersimétricos que pudieran ser verificadas experimentalmente, han resultado invalidadas cuando se han realizado los correspondientes experimentos. Según han ido incrementándose las energías de los aceleradores, los constructores de modelos supersimétricos han tenido que modificar éstos haciéndolos más alambicados, en particular suponiendo a los compañeros supersimétricos cada vez más y más pesados, para escapar a la observación.

Finalmente, se dirán unas palabras acerca de la interacción gravitatoria, y las teorías llamadas *de cuerdas*. De todas las interacciones que conocemos la más familiar de todas, la gravitación, es, paradójicamente, de la que sabemos menos a nivel microscópico. La teoría de la relatividad general de Einstein, extraordinariamente exitosa para interacciones macroscópicas, no dice absolutamente nada sobre las propiedades cuánticas de la gravedad. Lo que es peor, todos los intentos por construir una teoría de la gravedad consistente con la relatividad y la mecánica cuántica se han saldado con un fracaso. Las únicas teorías que parecen ofrecer alguna esperanza a parte de la comunidad de físicos de altas energías son las teorías de cuerdas. Aunque tampoco tengo dudas de que estas teorías continuarán siendo objeto de investigación en el siglo XXI, me resultaría sorprendente que resolvieran en un futuro próximo el problema sin el que una teoría física se queda en mera especulación, a saber: producir predicciones que se puedan verificar experimentalmente. También es cierto que mi pesimismo no es unánimemente compartido por la comunidad de físicos de altas energías.

BIBLIOGRAFÍA

- ÁLVAREZ-ESTRADA, R. F. y RAMÓN MEDRANO, M.: *Partículas elementales*, Eudema, 1988.
- FRASER, G. (ed.): *The Particle Century*, Inst. of Physics, Londres, 1998. Colección de artículos por algunos de los más prominentes físicos modernos sobre temas de física de partículas.
- GELL-MANN, M.: *El quark y el jaguar*, Metaremas, 1995. Con capítulos sobre nuestro tema.
- *Revista de Española de Física*. El número monográfico dedicado a la mecánica cuántica (actualmente en prensa) tiene varios artículos relacionados con nuestro tema.

- SÁNCHEZ DEL RÍO, C.: *Principios de la física en su evolución histórica*, 1986. Más general que el anterior, abarcando otras ramas de la física.
- SÁNCHEZ RON, J. M.: *Marie Curie y la radioactividad*, CSN, 1998. Una excelente introducción a la física atómica y nuclear hasta la primera mitad del siglo.
- *Scientific American* (Versión española: *Investigación y Ciencia*). Esta prestigiosa revista publica regularmente artículos sobre nuestro tema, entre muchos otros.
- TAUBES, G.: *Nobel Dreams*, Random House, 1986. Entreteneda historia de algunos de los descubrimientos (y pseudodescubrimientos) modernos en física de partículas.
- YANG, C. N.: *Elementary Particles*. Muy claro y entretenido, sólo llega hasta 1970.
- YNDURÁIN, F. J.: *Teorías unificadas y constituyentes fundamentales de la materia*, Espasa Calpe, Madrid, 1988. Centrado en la física de partículas. Los logros y problemas de esta ciencia no han cambiado sustancialmente desde que se escribió el libro.
- —: «Espacio, Tiempo, Materia», *Revista Española de Física*, vol. 12, n.º 2, 1998. Se discuten algunas de las especulaciones de los últimos veinticinco años en física de partículas.
- —: «El mundo del microcosmos: Un siglo de física de partículas», en *La ciencia en tus manos*, Espasa Calpe, Madrid, 2000.