

Jeremy Bernstein es profesor emérito de física del Instituto de Tecnología Stevens, en Nueva Jersey. Ha escrito decenas de artículos de investigación, varias monografías técnicas y 14 libros de divulgación científica y senderismo.

Este artículo fue escrito cuatro meses antes de que el CERN anunciase el descubrimiento de una nueva partícula compatible con el bosón de Higgs.



ALTAS ENERGÍAS

Un abanico de partículas

¿Qué argumentos teóricos llevan a predecir la existencia de una partícula subatómica?

Jeremy Bernstein

LA FÍSICA TEÓRICA EN EL SIGLO xx SE HA CARACTERIZADO POR LA DETECCIÓN DE PARTÍCULAS CUYA existencia había sido predicha con anterioridad; en ocasiones, con décadas de antelación. También nos hemos encontrado con toda suerte de partículas que nadie esperaba. En esta ocasión, sin embargo, nuestro interés se centrará en cinco partículas pertenecientes al primer grupo. En orden de modernidad creciente, nos referimos al neutrino, el mesón pi, el antiprotón, los quarks y, por último, el bosón de Higgs. Comencemos por el neutrino.

El 4 de diciembre de 1930, Wolfgang Pauli envió una carta a un grupo de físicos que asistían a un simposio en Tubinga. Tras dirigirse a ellos como «queridas damas y caballeros radiactivos», Pauli se disculpaba por no acudir a la conferencia. Bailarín y algo mujeriego, se justificó alegando que un baile le reclamaba en Zúrich durante las mismas fechas. La carta constituye uno de los documentos más sorprendentes de la física del siglo xx.

A Pauli le preocupaba cierta anomalía observada en la desintegración beta. Años antes, el físico neozelandés Ernest Rutherford había llevado a cabo un extenso estudio sobre la radiactividad. Había identificado tres tipos de desintegraciones, a las que denominó alfa, beta y gamma. Algunos núcleos pesados, como los de plutonio, se desintegraban emitiendo una partícula alfa, o un núcleo de helio.

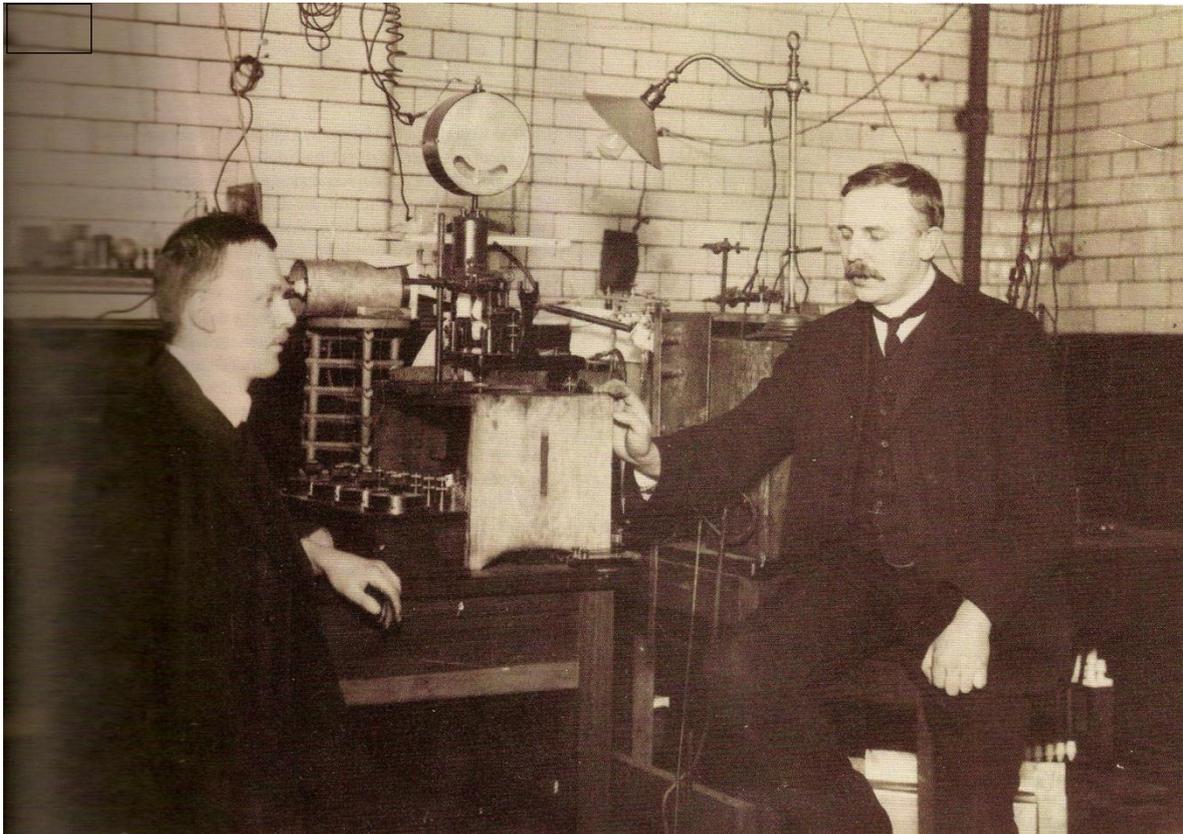
EN SÍNTESIS

En numerosas ocasiones, los físicos han predicho la existencia de una partícula subatómica mucho tiempo antes de que esta fuese observada en los experimentos.

Los argumentos para ello han sido de lo más variados: desde la conservación del momento hasta las propiedades matemáticas de algunos espacios algebraicos abstractos.

La existencia de antimateria apareció como consecuencia de combinar las leyes de la mecánica cuántica con las de la teoría de la relatividad especial de Einstein.

El bosón de Higgs fue propuesto para reconciliar la masa de las partículas con la existencia de ciertas simetrías que implican la aparición de las interacciones.



Ernest Rutherford (derecha) y Hans Geiger en 1912 junto a los instrumentos que empleaban para detectar partículas alfa. Rutherford cambió para siempre la física de partículas con aparatos de mesa. Hoy en día, la disciplina depende de enormes máquinas, como el Gran Colisionador de Hadrones del CERN, cerca de Ginebra.

Otros desprendían rayos gamma, o cuantos muy energéticos del campo electromagnético. Por último, había núcleos que producían una partícula beta: un electrón. Estos mostraban un comportamiento extraño.

La forma más obvia de imaginar el proceso consistía en suponer que un núcleo padre se transmutaba en un núcleo hijo y un electrón. Por tanto, como consecuencia de las leyes de conservación de la energía y el momento, todos los electrones emitidos de esta manera debían poseer la misma energía. Los datos experimentales, sin embargo, revelaban todo un abanico de energías. Tal era el rompecabezas que Niels Bohr llegó a proponer que la energía y el momento no se conservaban en la desintegración beta. Pauli, en cambio, opinaba que semejante propuesta carecía de sentido, por lo que propuso una explicación alternativa: sugirió que en la desintegración beta participaba una partícula invisible, la cual se llevaría parte de la energía y el momento. Esa partícula debía ser eléctricamente neutra y tenía que interactuar muy débilmente con las demás. De esta manera, desaparecería de la escena sin dejar rastro.

Ignoro por completo cómo asimilaron las damas y los caballeros radiactivos semejante propuesta. Tampoco queda claro hasta qué punto el propio Pauli se la tomaba en serio, pues nunca llegó a publicarla. Pero Enrico Fermi, en Roma, sí le dio crédito. Ello le permitió formular la primera teoría sobre la desintegración beta. Pauli había denominado «neutrón» a la nueva partícula. En 1932, sin embargo, James Chadwick descubrió lo

que hoy conocemos con ese nombre: el componente neutro de los núcleos atómicos. Además, en italiano *neutrone* significa «el gran neutro». Pero la nueva partícula, si existía, debía poseer una masa ínfima. Así que Fermi decidió llamarla *neutrino*, «el pequeño neutro». El nombre cuajó.

La primera vez que tuve noticia del neutrino, allá por los años cincuenta, su papel en la física nuclear resultaba incómodo, como el pariente loco de la familia al que todos desean ocultar. Esta circunstancia cambió con los reactores nucleares que Fermi construyó durante la guerra. Un reactor opera como una fábrica de elementos fisibles que se desintegran emitiendo partículas beta, por lo que generan ingentes cantidades de neutrinos. En 1956, los físicos Clyde Cowan y Fred Reines, que por aquel entonces trabajaban en Los Alamos, detectaron un flujo de más de 10 billones de neutrinos por segundo y centímetro cuadrado en las inmediaciones de la central nuclear de Savannah River, en Carolina del Sur. Podemos imaginar lo que debió sentir Pauli. Hoy los experimentos con neutrinos son moneda común. Sabemos que existen tres tipos distintos y que poseen una masa diminuta, lo que implica que se mueven a velocidades muy cercanas a la de la luz. Cierta experiencia reciente (en su momento muy debatido y ahora ya refutado) pareció indicar que se movían ligeramente más deprisa que la luz, algo que hubiese contravenido la teoría de la relatividad de Einstein. «Queridas damas y caballeros radiactivos», en efecto.

EL MESÓN PI

En 1909, Ernest Rutherford y dos de sus estudiantes descubrieron en Manchester el núcleo atómico, la parte del átomo en la que se concentra la mayor parte de su masa. Ello suscitó preguntas sobre la composición de esos núcleos y qué era lo que mantenía unidos a sus componentes. Dado que, en condiciones normales, los átomos carecen de carga eléctrica neta, el núcleo debía contener cargas positivas. Los electrones, dotados de carga negativa, se hallaban distribuidos por todo el átomo, por lo que su carga había de compensarse con las cargas positivas del núcleo. Pero estas, a las que se dio en llamar protones, no podían ser el final de la historia. Para explicar la masa de los átomos hacían falta también objetos neutros. Rutherford propuso la razonable sugerencia de que quizás el núcleo contuviese protones y electrones. Pero, en 1930, Pauli y otros investigadores demostraron que esa idea no se ajustaba a los datos espectroscópicos. El misterio quedó resuelto en 1932, cuando Chadwick descubrió el neutrón. Pero entonces, ¿qué mantenía unido al núcleo?

El tamaño de un núcleo atómico es decenas de miles de veces menor que la distancia que lo separa de los electrones más cercanos. Los electrones se ocupan de la química, mientras que el núcleo desempeña la función de un simple espectador. Esta configuración nos indica que la fuerza atractiva entre protones y electrones se deja sentir a muy largas distancias. Pero esa misma fuerza hace que dos protones se repelan, por lo que, si no hubiese una interacción que la contrarrestase, el núcleo se disgregaría. Dicha interacción debía ser mucho más intensa que la fuerza electromagnética, pero de corto alcance. A estas preguntas se enfrentaban los físicos cuando apareció en escena Hideky Yukawa.

Yukawa nació en Tokio en 1907. Su padre enseñaba geología en la Universidad Imperial de Tokio, donde Yukawa estudió y obtuvo el grado de doctor en 1929, justo cuando Japón entraba en depresión. Trabajó como ayudante de un profesor de física teórica sin recibir por ello paga alguna, mientras continuó viviendo en casa de sus padres. El acceso a las publicaciones académicas le permitía seguir el rápido desarrollo de la teoría

cuán tica. En 1932, Werner Heisenberg publicó tres artículos sobre las fuerzas nucleares. Como Chadwick, Heisenberg creía que el neutrón era en realidad una partícula compuesta por otras: en concreto, por un protón y un electrón ligados. Eso implicaba que el núcleo atómico contenía electrones. Yukawa, en cambio, pensaba que los neutrones eran partículas elementales, no formadas por otras. Sobre esta idea basó su teoría de las interacciones nucleares.

La descripción más clara de su teoría nos llega de la mano de los diagramas que Richard Feynman habría de concebir años más tarde. Examinemos primero el caso de dos electrones en interacción. La imagen que la electrodinámica cuántica nos brinda de este proceso se corresponde con dos electrones que intercambian un fotón «virtual», una palabra que quiere dar a entender que no podemos detectarlo de manera directa. Las matemáticas que describen dicho intercambio de fotones dan como resultado la misma fuerza repulsiva que, ya en el siglo XVIII, postulase el físico francés Charles-Augustin de Coulomb: su intensidad disminuye con el cuadrado de la distancia que media entre los objetos. Ello se debe a que la partícula transmisora fotón, carece de masa.

Pero la fuerza electromagnética no puede mantener el núcleo unido. Por varias razones: primero, porque es demasiado débil; y segundo, porque provoca que dos protones se repelan. Por tanto, Yukawa cambió el fotón por lo que él denominó un cuanto pesado «cuanto pesado». Su teoría permitía elegir la intensidad del acoplamiento entre dicho cuanto pesado y los protones, por lo que Yukawa escogió un valor adecuado para que la atracción resultante venciese a la repulsión electromagnética. También la masa del cuanto pesado podía elegirse con libertad. Según las leyes de la mecánica cuántica, cuanto mayor es la masa de la partícula que media una interacción, menor alcance tiene esta. Yukawa conocía el tamaño del núcleo atómico, lo que le permitió deducir que la masa del cuanto intermediario debía ascender a unas 200 veces la del electrón. En 1934 escribió artículo en un perfecto inglés que, un año después, vio la luz en una revista académica japonesa de prestigio. Su publicación pasó completamente inadvertida.

El cuanto pesado de Yukawa fue detectado en 1947 en los rayos cósmicos. Con el tiempo acabó recibiendo el nombre de mesón pi. Existían tres variedades: una neutra, una con carga positiva y otra con carga negativa. Con buena aproximación, su masa se correspondía la predicha por Yukawa. Las versiones dotadas de carga se desintegraban con rapidez en neutrinos y «mesones mu», como se llamaba



Wolfgang Pauli y Niels Bohr observan divertidos una peonza en la inauguración de un instituto de física en la ciudad sueca de Lund. El juguete se comportaba de manera distinta a la mayoría de las peonzas: giraba primero en un sentido y después en el opuesto. Años antes, Pauli había postulado la existencia de una nueva partícula elemental, el neutrino.

entonces a los muones (partículas similares al electrón, pero de mayor masa). En 1949, Yukawa se convirtió en el primer japonés galardonado con el premio Nobel. Edward Teller, físico nuclear no precisamente conocido por su habilidad para el verso humorístico, resumió su sorpresa ante el descubrimiento en los siguientes ripios:

*Hay mesones pi y hay mesones mu.
 Lo primeros nos sirven como pegamento nuclear.
 Hay mesones tau, o eso sospechamos,
 y otros muchos que aún no detectamos.
 ¿Puedes verlos, acaso?
 Bueno, apenas de refilón,
 porque su vida es breve
 y su alcance, escaso.
 La masa puede ser poca y puede ser mucha.
 Podemos hallar una carga positiva o una negativa,
 y algunos jamás se mostrarán en una placa,
 pues su carga es cero, aunque grande es su masa.
 ¿Cómo? ¿Ninguna carga en absoluto?
 No, ninguna en absoluto.
 O, si Blackett está en lo cierto,
 es tremendamente pequeña.*

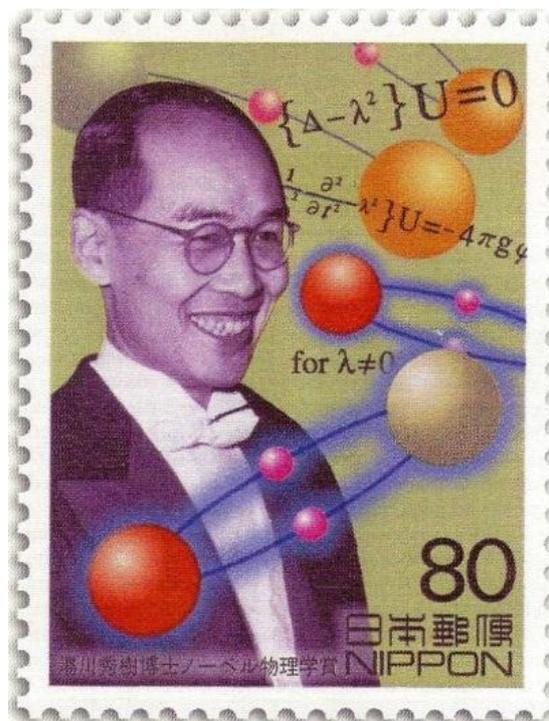
EL ANTIPROTÓN

En 1928, Paul Dirac escribió una ecuación para el electrón que conjugaba la teoría cuántica con la relatividad especial de Einstein. Hay quien afirma que se trata de la ecuación más hermosa de la física. Si bien quizá no haga falta llegar tan lejos, la expresión muestra una gran belleza:

$$\left(i\hbar\gamma^\mu \frac{\delta}{\delta x^\mu} - mc \right) \psi(x^\mu) = 0$$

Dirac convino de inmediato en que su ecuación sufría ciertos problemas. Para cada valor del momento del electrón existían cuatro soluciones, pero solo dos de ellas tenían sentido: las otras asignaban al electrón una energía negativa, algo absurdo. Durante un par de años, esto condujo a una situación que Pauli calificó de «física a la desesperada». Si el electrón poseía carga negativa y quedaba representado por las dos soluciones de energía positiva, entonces las otras dos debían corresponderse con una partícula idéntica al electrón, pero de carga opuesta. En ese momento nació la física de la antimateria. Por aquella época, sin embargo, nadie había observado ningún antielectrón. Eso cambió en 1933, cuando Carl Anderson, del Instituto de Tecnología de California, detectó uno en los rayos cósmicos. La nueva partícula acabó recibiendo el nombre de positrón.

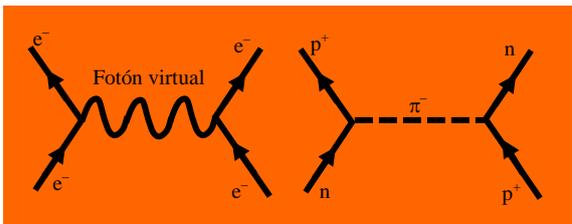
Una vez que se descubrió el positrón, los físicos comenzaron a tomar en serio la antimateria: toda partícula debía tener su correspondiente antipartícula. En algunos casos, como el del fotón o el del mesón pi neutro, partícula y antipartícula son idénticas. Los neutrinos no poseen carga, pero a día de hoy continua siendo una incógnita si coinciden o no con su antipartícula. Lo que sí queda fuera de toda duda es que, si una partícula tiene carga e , su



El físico japonés Hideki Yukawa elaboró una teoría de las interacciones nucleares que predecía la existencia de un mesón que, con una masa intermedia entre la del protón y el electrón, mantenía unido al núcleo atómico. La teoría se vio respaldada por los experimentos cuando se detectaron los mesones pi en los rayos cósmicos. Yukawa fue el primer japonés en ganar un premio Nobel.

antipartícula posee carga $-e$. Además, ambas deben tener exactamente la misma masa. En particular, el protón cuenta con una masa unas 2000 veces mayor que la del electrón y una carga igual a e . Por tanto, debía existir un antiprotón con la misma masa y con carga $-e$. ¿Cómo encontrarlo?

Los rayos cósmicos no ofrecían demasiadas posibilidades, ya que los antiprotones se aniquilan al entrar en contacto con la materia ordinaria y solo se observan los desechos de la desintegración. Hacía falta un acelerador con la potencia necesaria para crear un antiprotón. La idea consistía en acelerar un haz de protones a velocidades muy elevadas y luego estrellarlo contra un blanco; por ejemplo, hidrógeno líquido, un elemento cuyo núcleo consta solo de un protón. En la colisión se producirían antiprotones. Pero ¿cuánta energía necesitaría el acelerador? Aquí empezaban las complicaciones. Al principio tenemos dos protones, uno en el haz y otro en el blanco, de manera que la carga total asciende a dos unidades positivas. Deseamos crear un antiprotón, que posee una unidad de carga negativa. Dado que la carga total se conserva a lo largo del proceso, necesitamos que en el estado final haya tres protones y un antiprotón. Si llamamos p^c al antiprotón y p al protón, la reacción en la que estamos interesados viene dada por $p + p \rightarrow p + p + p + p^c$. No existe proceso más sencillo que ese. Pero ¿a cuánto debía ascender la energía mínima del protón del haz inicial? Un cálculo sencillo nos revela que esta debe equivaler a unas seis veces la masa del protón. Cuando se realizó esta estimación, no había acelerador en el mundo capaz de alcanzar semejante



Los diagramas de Feynman, con su propio alfabeto de símbolos, representan de forma muy intuitiva las interacciones entre partículas elementales. El diagrama de la izquierda muestra dos electrones intercambiando un fotón; el de la derecha, un protón y un neutrón intercambiando un mesón pi.

energía.

Hacia finales de los años cuarenta comenzaron los planes para construir dicha máquina en la Universidad de California en Berkeley. Allí trabajaba Ernest Lawrence, el inventor del ciclotrón. Además de un físico excelente, Lawrence gozaba del talento necesario para recaudar la cantidad de dinero que requería un acelerador de ese calado, al que se llamó Bevatrón, un nombre inspirado en la energía que se pretendía alcanzar. La empresa dio sus frutos: en 1955, un grupo de físicos experimentales anunció el descubrimiento del antiprotón. No creo que el acontecimiento causase verdadera sorpresa a nadie, pero marcó el nacimiento de una buena cantidad de literatura fantástica dedicada a la antimateria.

En 1956, aquellos sucesos fueron narrados con

gran detalle en *The New Yorker* en un poema firmado por H. P. F. Supe que las iniciales se referían a Harold Furth, físico y compañero mío en Harvard, donde escribía para la revista humorística universitaria *The Lampoon*. Bajo el título *Los peligros de la vida moderna*, su poema decía así:

*Mucho más allá de la troprostata
hay una región estelar y austera,
donde, en una veta de antimateria,
vivía el doctor Edward Anti-Teller.
Muy alejado de los orígenes de la Fusión,
vivía anónimo y tranquilo,
con todos sus antifamiliares y amigos,
y con macasares en sus sillas.
Una mañana, holgazaneando en el mar,
avistó un platillo de monstruoso contorno
que portaba tres letras: A. E. C.
y desde el que se alzó un visitante de la Tierra.
Entonces, gritando con regocijo sobre las arenas,
se encontraron dos seres que, a su extraña manera,
eran tan iguales como dos lentejas.
Sus manos derechas se estrecharon
y el resto fueron rayos gamma.*

Desconozco dónde se encuentra la «tropolstata», pero donde sin duda puede hallarse una gran cantidad de antiprotones es en el cinturón interior de Van Allen. Los cinturones de Van Allen son regiones anulares que rodean nuestro planeta y en las que las partículas quedan retenidas por efecto del campo magnético terrestre. El cinturón interior se extiende entre unos 1000 y 10.000 kilómetros por



En la película *Ángeles y Demonios*, de 2009, los protagonistas tratan de evitar la construcción de una bomba de antimateria. El concepto de antimateria ha creado cierto revuelo en la opinión pública. En 1930, Paul Dirac predijo la existencia de la antipartícula del electrón tras desarrollar la primera descripción del electrón compatible a la vez con la mecánica cuántica y la relatividad especial de Einstein. Los físicos del Laboratorio Nacional Lawrence usaron el Bevatrón para producir el antiprotón.

encima de la superficie de la Tierra. Algunos protones de energía muy elevada permanecen atrapados allí, donde producen antiprotones mediante procesos muy similares a los que se realizaron en el Bevatrón. Por fortuna, no hay tantos como para que supongan una amenaza para los viajes espaciales.

EL QUARK

*Three quarks for Muster Mark!
Sure he hasn't got much of a bark.
And sure any he has it's all beside the mark.
(James Joyce, Finnegans Wake)*

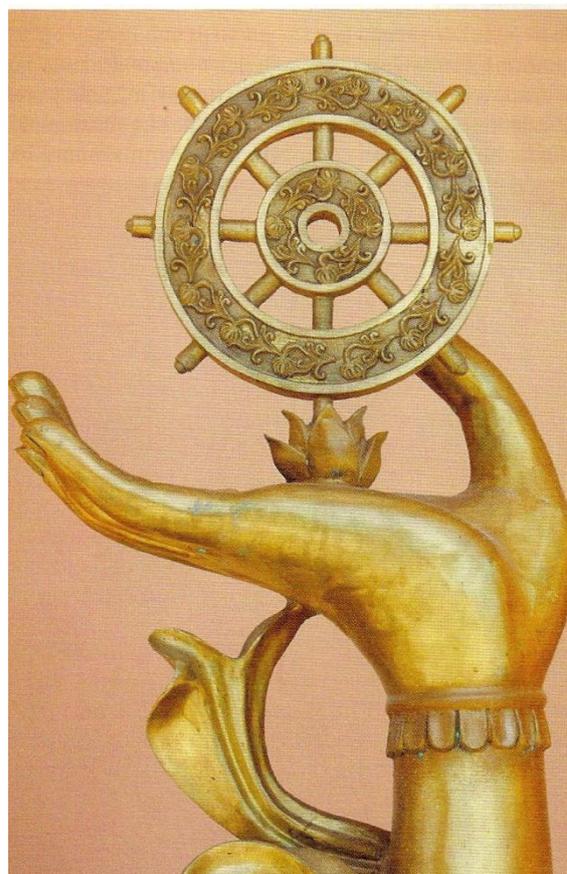
En marzo de 1963 asistí a una conferencia de Murray Gell-Mann en la universidad de Columbia. En ella, el físico expuso una teoría que había concebido para clasificar partículas elementales. No sin cierto humor, su método se denominaba *camino óctuple*. De acuerdo con la doctrina budista, para llegar al nirvana debe seguirse el «noble camino óctuple», que invita a observar un discurso correcto, una intención correcta y una meditación correcta. El camino propuesto por Gell-Mann para alcanzar el fin del sufrimiento consistía, en cambio, en un modelo para clasificar una desconcertante cantidad de partículas que nadie había predicho ni entendía. El número ocho desempeñaba en él un papel esencial. A pesar de sus aparentes diferencias, las partículas parecían poder clasificarse en *multipletes*: conjuntos de partículas con características predecibles. Uno de los primeros que se identificaron fue un octuplete (u «octeto») que incluía, entre otros, los mesones pi. En el seminario, Robert Serber, un físico de la Universidad de Columbia tan brillante como reservado, formuló una pregunta. Había estudiado el trabajo de Gell-Mann y se había apercibido de que el multiplete más sencillo que podía construirse era uno que contenía solo tres partículas. ¿Había considerado Gell-Mann tal posibilidad? Sí, pero le había llevado a un callejón sin salida. Gell-Mann comentó algo sobre el tema y, más tarde, se unió a alguno de nosotros en un restaurante chino. Allí tuvo lugar una frenética discusión.

Imaginemos que tal triplete existe, se dijo en la conversación. La idea entonces consistiría en usar esas tres partículas a modo de ladrillos para construir todas las demás. Eso ya se había intentado con anterioridad. Fermi, entre otros, había imaginado que los mesones pi se componían de protones, neutrones y sus correspondientes antipartículas. El mesón pi con carga negativa estaría formado por un neutrón y un antiprotón. Pero, cuando empezaron a descubrirse todas

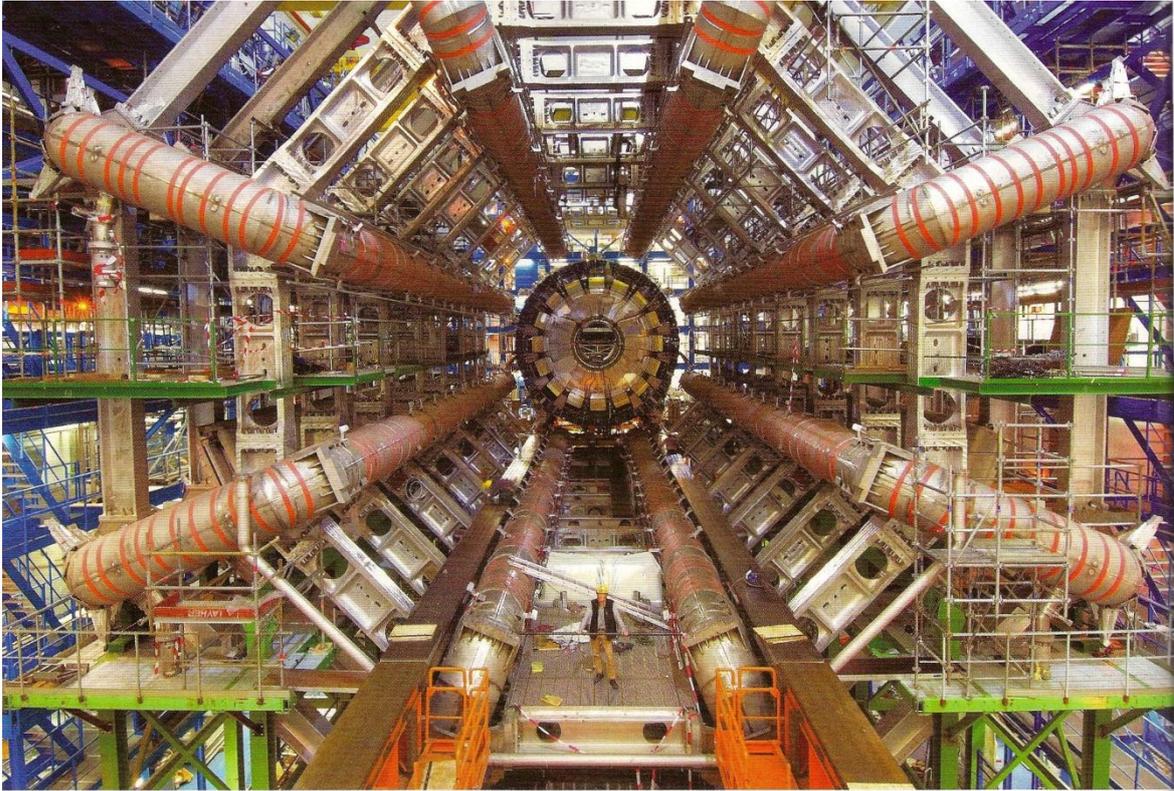
aquellas partículas nuevas, había que generalizar la idea.

El japonés Soichi Sakata había propuesto un modelo en el que todas las partículas se hallaban compuestas por otras tres más elementales: el protón, el neutrón y el Λ^0 (lambda cero), una nueva partícula que había sido descubierta poco antes. Aunque todas las partículas conocidas podían construirse a partir de esas tres, el modelo de Sakata no resultaba demasiado convincente. No solo no explicaba por qué esas tres partículas eran más elementales que el resto, sino que predecía otras que no habían sido observadas jamás. Por último, tampoco se mostraba compatible con el camino óctuple, que tan bien parecía funcionar. Así pues, Gell-Mann se vio obligado a empezar de cero.

No había ninguna razón para que el triplete del camino óctuple tuviese que estar compuesto por partículas ya conocidas. De hecho, el modelo de Sakata parecía insinuar que era mejor no ir en esa dirección. Así que Gell-Mann introdujo tres partículas hipotéticas nuevas a las que llamó *arriba*, *abajo* y *extraño*; o *u*, *d* y *s*, respectivamente (sus iniciales en inglés). Ahora ya podía empezar a construir las partículas conocidas. El protón, por ejemplo, constaría de la combinación *uud*; el neutrón sería *udd*, y la partícula Λ^0 , *uds*. Pero entonces surgía un problema: ¿carga eléctrica poseían las nuevas partículas? Hasta ese momento, todas las cargas observadas en la naturaleza se correspondían con un múltiplo entero de la del electrón. Si a este se le asigna carga -1, al protón le corresponde el valor +1. Si aplicamos dicha regla a los ladrillos *u*, *d* y *s* con el objeto de reproducir las cargas de las demás partículas, nos veremos en un



En esta estatua del templo Budista de Khanh Anh, en Francia, una mano abierta sostiene la rueda del *dharma*, empleada para simbolizar el «noble camino óctuple», o los ocho principios básicos del Budismo. En los años sesenta, Murray Gell-Mann desarrolló una teoría para clasificar la gran cantidad de partículas que habían sido detectadas en los aceleradores. El modelo fue bautizado como *camino óctuple*, pues sus propiedades matemáticas dependían de ese número en un álgebra abstracta. Ello le llevó a predecir la existencia de los quarks.



El Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN no es solo el acelerador de partículas más potente que existe, sino también el mayor experimento físico jamás construido. Con él, los físicos intentan estudiar las condiciones a las que se encontraba la materia poco después de la gran explosión. Para ello, hacen colisionar haces de partículas subatómicas llamadas hadrones (ya se trate de protones o de núcleos atómicos pesados) a energías muy elevadas. Es de esperar que tales experimentos aporten pistas sobre el origen de la masa de las partículas fundamentales. Uno de los objetivos del LHC es hallar el bosón de Higgs, cuya existencia fue propuesta hace casi cuarenta años.

callejón sin salida. Imaginemos que a la partícula u le asignamos una unidad de carga. Para obtener la carga del protón (uud), la partícula d debería poseer entonces una unidad de carga negativa. Pero, en tal caso, el neutrón (udd) tendría también carga negativa. Resulta imposible cuadrar las cuentas si nos empeñamos en manejar múltiplos enteros de la carga del electrón. ¿Qué hacer?

Gell-Mann intentó algo que solo podía tratarse de una locura o de una genialidad: asignar cargas fraccionarias. La partícula u quedaba así con carga $+2/3$, mientras que a d y s les adjudicó el valor $-1/3$. El modelo funcionaba, pero a costa de introducir un tipo de partículas que nunca nadie había observado. ¿Dónde estaban? Deberían verse como el Sol en un cielo despejado. La búsqueda comenzó de inmediato.

Mientras, Gell-Mann decidió darles nombre. Cuando había comenzado a pensar en las nuevas partículas, le había venido a la cabeza un sonido relacionado con una de sus aficiones, la ornitología: algo así como *cuac*. Pero Gell-Mann siempre había mostrado un gran interés por la lingüística y los juegos de palabras como los que llenan *Finnegans Wake*, de James Joyce. Un día, al hojear el libro, dio con la frase «¡Tres quarks para Muster Mark!». Ello le bastó para decidirse a fijar en *quark* la grafía del nuevo vocablo. Había nacido un nuevo término. (Con independencia de la palabra alemana *Quark*, que designa un tipo de queso fresco.)

Muy pronto quedó patente que los quarks libres

no se observarían jamás. Haciendo de la necesidad virtud, se inventó una dinámica que confinaba los quarks en el interior de las partículas. Según esta idea, los quarks intercambiarían *gluones* (de la voz inglesa *glue*, «pegamento»). Pero la dinámica de los gluones exhibía una característica muy peculiar. Antes mencionamos que la intensidad de las fuerzas decrece con la distancia. En el caso de la interacción mediada por mesones pi, de hecho, ese desvanecimiento ocurre muy deprisa. Los gluones, sin embargo, se rigen por el principio opuesto. Podemos pensar en una goma elástica: la fuerza que tira de sus extremos aumenta cuanto más la estiramos. Por supuesto, llega un momento en el que la goma se rompe. Pero con los quarks no ocurre así: la fuerza entre ellos simplemente crece con la distancia de separación. Por tanto, permanecerán siempre prisioneros en sus celdas, las partículas.

Para algunos, semejante propiedad suscitaba una pregunta: ¿hasta qué punto podemos decir que los quarks existen? Cuando la oí por primera vez, recordé las discusiones de finales del siglo XIX y principios del XX acerca de si los átomos existían realmente. Por aquel entonces, aún no se habían observado. Einstein, lúcido testigo de la época, lo explicó así: hay dos tipos de átomos, el del físico y el del químico. Este último corresponde a un *símbolo visual*. Podemos dibujar un diagrama de la molécula de agua sin conocer en absoluto la masa ni el tamaño de los átomos de hidrógeno u oxígeno. Pero los físicos sí desean saber el valor preciso de

esas masas y tamaños. Un químico argumentaría que los átomos existen, mientras que un físico podría expresar sus reservas. Pero con los quarks la situación se plantea mucho más peliaguda, pues, en estado libre, resultan inobservables por cuestión de principio.

En 1960 se construyó un nuevo acelerador, el Colisionador Lineal de Stanford. Al contrario que en los ciclotrones, donde las partículas viajan en círculos, la nueva máquina aceleraba electrones a una energía muy elevada a lo largo de un camino recto de dos kilómetros y los hacía colisionar contra un blanco de protones. La mayoría de los físicos pensaban que los electrones atravesarían los protones sin más. Pero no sucedió así. Los resultados mostraban que los electrones se topaban con objetos duros en el interior del protón. Aún más: esos objetos poseían las cargas fraccionarias asignadas a los quarks. A partir de entonces, argumentar que los quarks no existían se volvió mucho más complicado.

Sería una negligencia no resumir lo que ocurrió tras ese descubrimiento. Hoy sabemos que hay seis tipos de quarks. Además de los anteriores, existen las variedades *encanto*, *fondo* y *cima*; o *c*, *b* y *t*. Todos poseen cargas fraccionarias, y sus masas abarcan desde una pequeña fracción hasta unas 200 veces la masa del protón. Pero la situación resulta algo más compleja. Las leyes de la mecánica cuántica imponen que una partícula no puede contener dos quarks idénticos, lo cual se debe al principio de exclusión de Pauli. El protón contiene dos quarks *u*; sin embargo, el problema se evita porque cada uno de ellos puede adoptar un estado con distinto momento angular. Pero en 1964 se descubrió en el Acelerador Nacional de Brookhaven una partícula llamada Ω^- (omega menos). El camino óctuple de Gell-Mann había predicho su existencia, pues era la pieza que faltaba en un decuplete. Sin embargo, se componía de tres quarks *s*, algo que el principio de exclusión de Pauli ya no permitía.

Para obtener distintos tipos de quarks, los teóricos inventaron una nueva propiedad denominada «color». Aquí la palabra que como metáfora para indicar cierto rasgo que permite distinguir entre unos quarks y otros. La elección de los colores suele reflejar la nacionalidad del físico que habla de ellos. A algunos estadounidenses les gusta usar el rojo, el azul y el blanco, por tanto, cuando decimos que la partícula Ω^- se encuentra formada por tres quarks *s*, se entiende que cada uno de un color distinto. Si usted cree que todo lo anterior complicado, debería echar un vistazo a la lista de partículas conocidas. Que todas ellas se hallen compuestas por una cantidad tan limitada de objetos con apenas unas pocas propiedades constituye un hecho realmente destacable.

Peter Higgs, físico teórico de la Universidad de Edimburgo, explicó cómo las partículas fundamentales adquirieron masa cuando la gran explosión formó el universo. También predijo la existencia de la partícula elemental que hoy conocemos como bosón de Higgs.

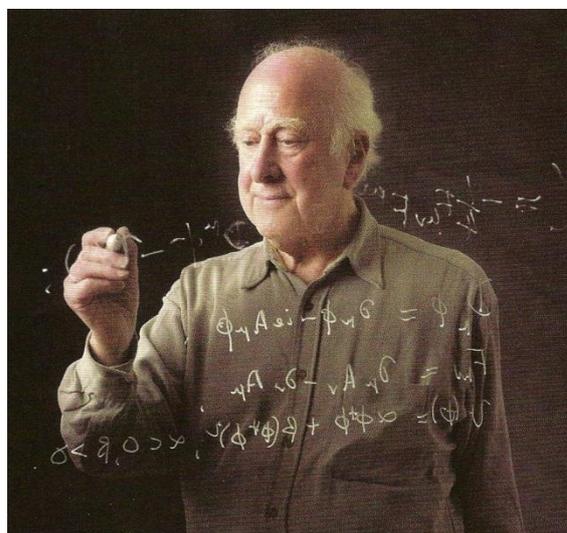


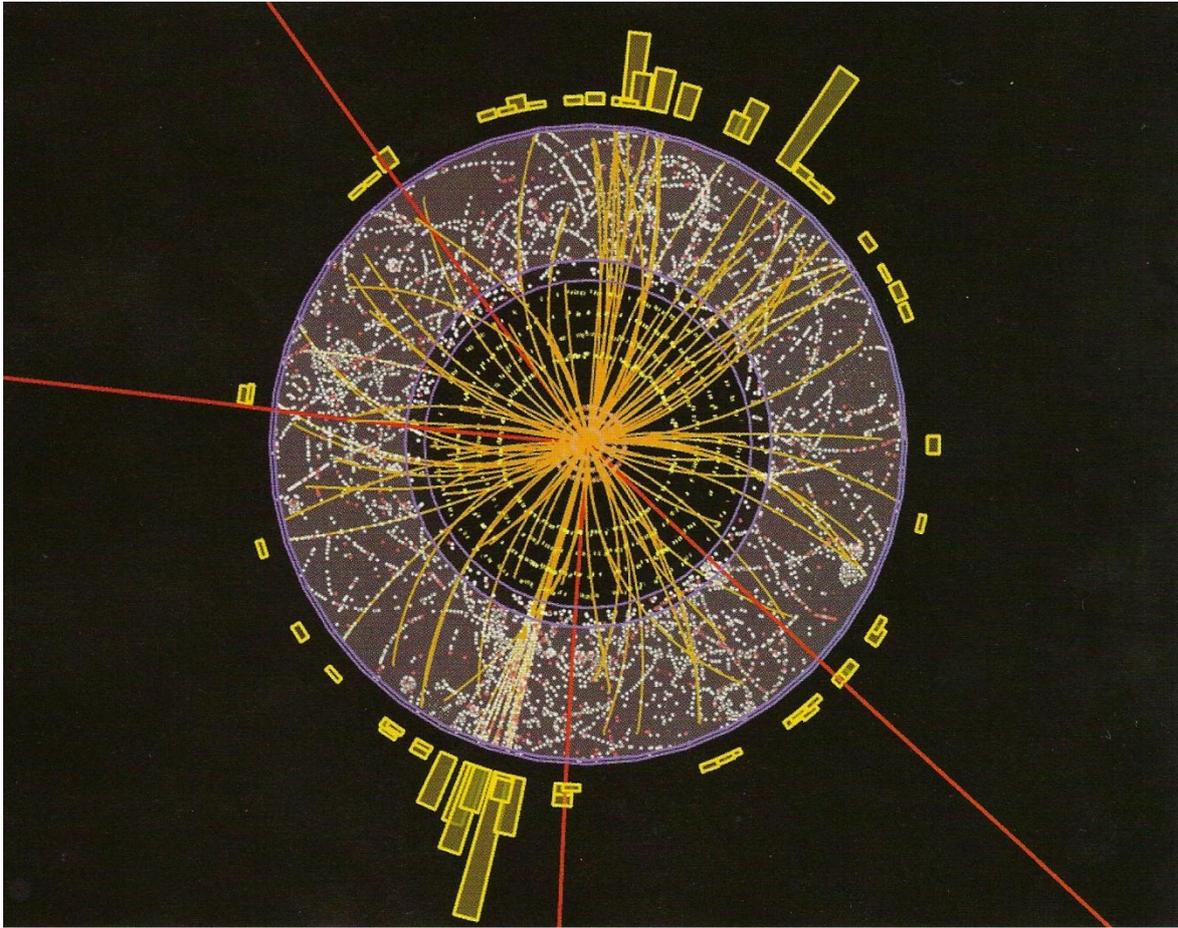
Estas figuras muestran la división de las líneas de los espectros atómicos cuando se aplica un campo magnético externo.

EL BOSÓN DE HIGGS

Desde el principio estuvo claro que el camino óctuple aparecía secuencia de una simetría aproximada. Ello quedaba patente por la masa de las partículas. Los mesones π formaban parte de un octuplete junto a los mesones *K*, pero la masa de los segundos superaba en unas tres veces a la de los primeros. De tratarse de una simetría exacta, todas las partículas pertenecientes a un mismo octuplete poseerían la misma masa. De hecho, si nos fijamos en las propiedades de estas partículas, no resulta nada evidente que guarden relación alguna entre sí. Ello dificulta enormemente la búsqueda de la simetría que las unificaba.

El tipo de ruptura de simetría presente en el camino óctuple es tan antiguo como la propia mecánica cuántica. Fue considerado por vez primera por el matemático Hermann Weyl y el físico Eugene Wigner, quien lo aplicó a los espectros atómicos. En





El pasado mes de diciembre el CERN hizo pública esta imagen, tomada en el detector del experimento ATLAS del LHC. En ella se observan cuatro muones que han sido creados tras una colisión entre protones. Dicho proceso es uno de los que se espera observar en caso de que se produzca un bosón de Higgs. El experimento ATLAS ha ayudado a delimitar el intervalo de masas posibles que podría tener el bosón de Higgs.

el átomo, los electrones se mueven en «órbitas» alrededor del núcleo. La cuantización de esas órbitas supuso la culminación de un gran trabajo por parte de Niels Bohr. Los electrones tienden a situarse en la órbita de menor energía, o estado fundamental. Pero, si la energía térmica o un impulso eléctrico excita el átomo, los electrones saltan a órbitas más energéticas. Cuando la perturbación cesa, regresan a las órbitas originales y, en el proceso, emiten radiación. Esta produce los característicos espectros atómicos. El espectro de un átomo viene a ser como su huella dactilar, por lo que siempre nos revela de qué elemento se trata. Gracias a ello sabemos, por ejemplo, que la atmósfera del Sol contiene helio.

Las líneas de un espectro atómico reflejan las distintas simetrías que exhiben las órbitas de los electrones. Sin embargo, cuando colocamos un átomo en un campo magnético, algunas simetrías pueden perderse. Como consecuencia, lo que antes aparecía como una sola línea se divide en un grupo de ellas. Resulta posible calcular el número y la intensidad de dichas divisiones, pues quedan determinadas por la simetría que ha desaparecido. Este tipo de ruptura de simetría, considerado por Wigner y Weyl, es el que tiene lugar en el camino óctuple. Aparece una perturbación que rompe la simetría, de manera que surgen diferencias entre las

masas de los componentes de un multiplete. Si efectuamos los cálculos con cuidado, obtendremos que dichas variaciones entre las masas se encuentran relacionadas. Dicho resultado coincide con los datos experimentales, lo cual aumenta nuestra confianza en el modelo.

Supé por primera vez de la ruptura de simetría descrita por Wigner y Weyl a finales de los años sesenta, en mis cursos de mecánica cuántica. Pero, en 1961, Yoichiro Nambu y su estudiante Giovanni Jona-Lasinio publicaron dos artículos que lo cambiaron todo: introdujeron un tipo completamente nuevo de ruptura de simetría. En el discurso que Nambu pronunció al recoger el premio Nobel en 2008, propuso el siguiente ejemplo: «Consideremos una barra elástica en posición vertical. Esta posee una simetría frente a rotaciones, ya que presentará el mismo aspecto sea cual sea la dirección horizontal desde la que miremos. Pero, si aplicamos presión y la barra se comba, lo hará en una dirección determinada y la simetría desaparecerá. En principio, la flexión podía haberse producido en cualquier dirección, pues todas ellas eran equivalentes. Pero no apreciaremos ese hecho hasta que no repitamos el experimento varias veces».

Otro ejemplo consiste en tomar la misma barra y colocarla de pie en el suelo. La mecánica cuántica nos dice que nunca adoptará una posición

perfectamente vertical: siempre existirá una indeterminación mínima en el ángulo que forme con el suelo. En algún momento caerá. Puede hacerla en cualquier dirección, pero, una vez que eso ocurra, la simetría original habrá desaparecido. De forma más abstracta, diremos que una ecuación puede exhibir ciertas simetrías, pero sus soluciones no están obligadas a respetarla. Este fenómeno se denomina ruptura *espontánea* de simetría, para distinguirla de la ruptura de simetría descrita por Wigner y Weyl, en la que simplemente se agrega un término que no respeta la simetría a las ecuaciones. Aquí no añadimos nada.

Las ideas de Nambu permean numerosas áreas de la física. Además de la teoría de las partículas fundamentales, las aplicó a los imanes, los cristales y los superconductores. Pero fue al estudiar uno de sus modelos de física de partículas cuando se topó con una sorpresa. Hacia los años veinte del siglo XX, el físico indio Satyendra Nath Bose introdujo un tipo de estadística que debían obedecer algunas partículas, como los mesones π y K . Bose aplicó sus ideas a los fotones y envió el artículo a Einstein, quien sugirió algunas correcciones y consiguió que se publicase. En honor a Bose, las partículas que obedecen esta estadística se denominan hoy *bosones*. La otra clase de partículas, entre las que se cuentan el electrón, el protón y el neutrino, reciben el nombre de *fermiones*, por Fermi.

La sorpresa con la que se encontró Nambu resultó ser un bosón de masa nula. En aquel momento se sabía que los fotones carecían de masa. Y se pensaba que también los neutrinos tenían masa nula (una suposición que años más tarde se demostraría falsa). Sin embargo, no se conocía, ni entonces ni ahora, ningún bosón del tipo predicho por Nambu. Al principio se pensó que quizá todo se debiese a un artificio de su modelo. Pero en 1961, el físico británico Jeffrey Goldstone halló en otro modelo la misma clase de partículas, hoy conocidas como bosones de Nambu-Goldstone. Todo el mundo comenzó a pensar que dichos bosones constituirían una plaga ubicua en todo proceso de ruptura espontánea de simetría. De ser así, el fenómeno carecería de relevancia en el campo de la física de partículas elementales.

El gran avance llegó en 1964 de la mano de Walter Gilbert, profesor de biofísica en Harvard, cofundador de la empresa de biotecnología Biogen y ganador en 1980 del premio Nobel de química. Los argumentos de Nambu y Goldstone eran correctos pero no lo suficientemente generales. Gilbert analizó las premisas de sus trabajos y se percató de que el electromagnetismo no las satisfacía. Aquello supuso una auténtica liberación para los físicos teóricos. El primero en explotarla por completo, al menos sobre el papel, fue el físico británico Peter Higgs. Este consideró un modelo que describía la interacción entre un fotón de masa nula y otros bosones. La teoría presentaba cierta simetría. Esta se rompía de manera espontánea y, entonces, ocurría el milagro: el fotón se volvía masivo y aparecía un bosón *con* masa, hoy universalmente conocido como bosón de Higgs. Hay que ver los detalles

matemáticos para creerlo.

El primero en aplicar esas ideas con éxito fue Steven Weinberg. Para explicar sus logros, hemos de retroceder algo en el tiempo. Desde un punto de vista muy general, en la naturaleza existen cuatro fuerzas fundamentales. La interacción fuerte mantiene a los quarks confinados en partículas como el protón mediante el intercambio de gluones. La siguiente en intensidad es el electromagnetismo, en el que partículas dotadas de carga intercambian fotones. Pospondremos la discusión sobre las interacciones débiles (las siguientes en intensidad) para mencionar la más débil de todas: la gravedad. En este caso intercambian gravitones, los cuales jamás han sido observados y que según algunos investigadores, jamás se detectarán. Puede parecer paradójico que la gravedad aparezca como la fuerza menos intensa de todas, ya que nosotros la experimentamos de manera constante. Pero ello se debe a que ejerce solo efectos atractivos, por lo que siempre se suman. Gracias a ello, la Tierra nos mantiene con los pies en el suelo.

Las interacciones débiles causan, entre otros fenómenos, la desintegración beta. Fermi intentó basarse en el electromagnetismo para modelarla, pero introdujo una modificación de gran calado: las partículas transmisoras de su teoría poseían, de manera efectiva, una masa infinita. Ello implicaba que la fuerza presentaba un alcance nulo, por lo que, para interactuar, las partículas debían superponerse. La teoría parecía funcionar bien, pero desentonaba con el resto de las interacciones, en las partículas mediadoras tenían masas razonables. De modo que se propusieron nuevas partículas que mediasen en la interacción débil. Su masa debía ser muy elevada, pero finita. Había tres: dos con carga eléctrica, denominadas bosones W (por *weak*, «débil» en inglés) y una neutra, a la que se llamó bosón Z por razones menos claras. Ambas clases de partículas fueron detectadas en 1983: su masa resultó ser unas 90 del protón. Los físicos ya habían supuesto que existirían y habían elaborado teorías sobre ellas con las que llevaban trabajando muchos años. Sin embargo, aquellos modelos adolecían de un problema muy serio: predecían resultados infinitos que no se dejaban tratar con las técnicas de renormalización, las mismas que permitían eliminar los infinitos en electrodinámica cuántica. La situación era desesperante hasta que llegó Weinberg.

La teoría de las interacciones electrodébiles de Weinberg empieza con una situación simétrica en la que ni los fotones ni los bosones que median las interacciones débiles tienen masa. Estos interactúan con otros bosones, de manera análoga a como sucedía en el modelo de Higgs. Entonces, la simetría se rompe espontáneamente y el milagro sucede de nuevo: los bosones que median las interacciones débiles adquieren masa, el bosón de Higgs también, pero el fotón no. Además, los infinitos se vuelven tratables. Todo encaja como las piezas de un reloj suizo, pero deja abierta una cuestión: ¿dónde está el bosón de Higgs?

Nunca la física ha invertido tanto tiempo y

dinero en una cacería similar. Hemos emprendido un largo viaje desde los tiempos de Rutherford, que descubrió el núcleo atómico con un experimento que cabía en una mesa de laboratorio. Tres gigantescos aceleradores han participado en la búsqueda, dos de ellos en la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN). El más antiguo de los aceleradores del CERN, el Gran Colisionador Electrón-Positrón (LEP), ha sido desmantelado. Nos enseñó que, en caso de existir, el bosón de Higgs debía tener una masa 120 veces mayor que la del protón. Sin embargo, no halló pruebas de su existencia. Los experimentos del Tevatrón del Fermilab, cerca de Chicago, hoy también clausurado por falta de fondos, mejoraron esa cota en unos tantos por ciento. Los teóricos han presentado argumentos convincentes sobre el valor máximo permitido para la masa del bosón de Higgs. Las posibilidades que quedan se encuentran al alcance del Gran Colisionador de Hadrones (LHC), el flamante acelerador del CERN.

Si el LHC confirma la existencia del bosón de Higgs, marcará el punto final de un largo capítulo de la física teórica. La historia me recuerda a la de un compañero francés. Cierta parámetro había sido bautizado con su nombre, por lo que aparecía con bastante frecuencia en las discusiones sobre las interacciones débiles. Al final, el parámetro fue medido y el modelo confirmado en los experimentos. Sin embargo, cuando fui a felicitarle, lo hallé entristecido porque ya no se hablaría más de su parámetro. Si el bosón de Higgs no apareciese, la situación se tornaría muy interesante, puesto que nos veríamos ante imperiosa necesidad de inventar nueva física.

No creo que demasiados colegas de profesión coincidan conmigo en este último punto. Me recuerda a la historia de Einstein cuando recibió el telegrama en el que se le comunicó que acababan de medir la curvatura de la luz al pasar cerca del Sol, tal y como predecía su teoría de la relatividad general. Lleno de alegría, se lo mostró a Ilse Rosenthal-Schneider, una de sus estudiantes. Ella le preguntó cuál habría sido su reacción si la noticia hubiese sido la contraria. *«Da kommt mir halt der lieber Gott leid tuno Die Theorie stimmt doch»*, contestó Einstein: *«Entonces podría haberlo sentido por nuestro querido Dios. La teoría es correcta»*.