

# El bosón de Higgs: la partícula maldita

*The Higgs boson: the goddam particle*

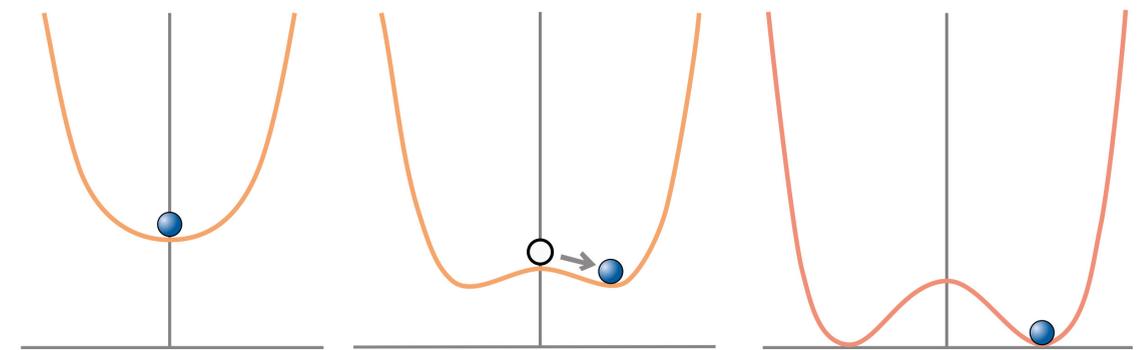
■ Javier Santaolalla Camino\*

■ Si quiere algún día enfadar a un físico lo tiene fácil. Pregúntele por la partícula de Dios. Justo con estas palabras: «partícula», «de» y «Dios». Más allá del aprieto en el que colocará a su interlocutor (aprieto del que muy pocos físicos seguramente puedan salir airosos, bien por la complejidad del concepto, bien por la dificultad de expresarlo con términos llanos), es posible que además observe cierta irritación, que será más pronunciada cuanto más relacionada se halle su área de trabajo con esa «maldita» partícula.

Y la irritación está justificada, tanto como el calificativo «maldita», que como se verá es mucho más apropiado. El autor del despropósito, Leon Lederman, se justifica. Éste, además de ser un famoso físico experimental, premio Nobel en Física (1988) y ex director de uno de los laboratorios más punteros del mundo, es un poco guasón. No hay más que leer su aclamado libro *La Partícula Divina* (Crítica, 2007) para apreciar su tono ácido y su humor puntilloso. En él vuelan dardos junto con chistes muchas veces ingeniosos, aunque en ocasiones puedan resultar inapropiados o simplemente gamberros, a la vez que emplea símiles muy bien traídos y explicaciones de un alto nivel divulgador. Del contenido del libro, lo referente a la «partícula divina» fue sin duda su mejor broma. Por considerarlo así, una broma, él se justifica. Como se sabe, detrás de la mayoría de los actos humanos hay una *motivación aparente*, que suena bien a casi todos, y otra que es la *motivación verdadera*. Calificar la partícula protagonista de este artículo de «divina» es un buen ejemplo de esto. Enseguida lo veremos.

En el origen del Universo, escasas fracciones de segundo después del *Big Bang*, toda la materia y energía del mismo se encontraban concentrados en un volumen pequeño (una canica, por ejemplo). En este estado de altísima densidad de energía, el mundo era muy diferente del actual. De hecho, parece haber consenso a cerca de que en ese

\* El autor es ingeniero superior en Telecomunicaciones, Físico, doctor en Física de partículas y miembro del grupo «The Big Van Theory». Realizó su labor de investigación en la Agencia Espacial Francesa (proyecto Galileo) y en el experimento CMS del LHC en el CERN (Ginebra), donde hizo su tesis con una beca del CIEMAT.

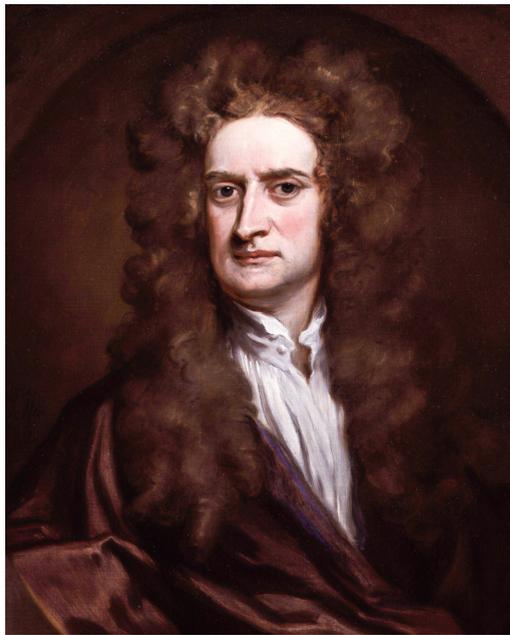


Al principio del Universo, en la «situación equilibrio», las partículas carecían de masa y se comportaban todas igual. La alta densidad de energía del Universo les permitía estar en un estado de falso equilibrio (como el de la canica de la figura central). Pero, al caer la densidad de energía y siguiendo con el símil, la canica rodó hasta un punto de equilibrio (figura de la derecha), es lo que se conoce como **ruptura espontánea de simetría**, y esto hizo que los bosones W y Z, como el resto de partículas, adquirieran masa. Obviamente, la canica solo es un instrumento para explicar el concepto

momento el Universo era muy simple. Entendamos simple por «matemáticamente simple» o fácil de describir. Todas las partículas eran muy parecidas, las fuerzas con las que interactuaban también y no existía la masa; por lo tanto, era un marco ideal para asentar una teoría física, una ecuación con pocos elementos. No cuesta imaginar que 13.800 millones de años después, año arriba, año abajo, el Universo haya cambiado mucho, se haya expandido hasta alcanzar un gran tamaño y se haya enfriado, y el mundo muestre una diversidad fascinante, con formas tan pintorescas como la vida humana. Recuerda que según el Universo se expande sin cesar desde su inicio, la energía (que es constante desde que se creó) tiene que distribuirse en más espacio, por lo tanto, queda menos energía para el mismo volumen. En otras palabras, según el Universo se expande, la densidad de energía disminuye, esto es, «el Universo se enfría». Y al enfriarse el Universo se diversifica. Esa simplicidad inicial (estamos hablando de unos  $10^{-22}$  segundos de tiempo después del *Big Bang*) se tuvo que romper. Llámalo «transición de fase», «ruptura espontánea de simetría electrodébil» (véase figura) o, simplemente, di que se armó el lío. Da igual. El caso es que la densidad de energía en el Universo ya no era lo suficientemente alta como para mantener ese estado de «alto karma». El de la simplicidad matemática.

Era un estado metaestable, término con el que se quiere denotar una estabilidad frágil o fácil de romper, como la de una pelota en la cima de una colina estrecha, que se mantiene a duras penas en equilibrio hasta que algo la hace caer. Esa colina es el «campo de Higgs», al acto de caer la pelota se le llama «ruptura espontánea de simetría electrodébil». Ya la hemos liado... Nada volverá a ser lo que era.

Por ese simple acto, las partículas de repente adquieren masa, se diferencian unas de otras, se mueven con menos facilidad y da comienzo la «fiesta cósmica». De ahí a una estrella brillando, un planeta rocoso dando vueltas en torno a ella, unas proteínas sumergidas en un caldo primigenio, unos reptiles saliendo del agua, unos monos bajándose del árbol, las ciudades-estado, la revolución industrial y *Gran Hermano VIP*, todo es cuestión de tiempo, de paciencia. A los físicos nos cuesta horrores describir tanta variedad con términos matemáticos simples. Cumplir nuestro objetivo, encontrar una ecuación, el santo grial, que lo mismo explique la formación de la vida, la lluvia, la luz del Sol o que ese vestido se vea azul y negro o blanco y dorado, es, después de varios miles de millones de años, más difícil. Aquí es donde Leon Lederman encuentra su justificación. Este salto, de un mundo simple a la diversidad y la complejidad, le recuerda a la Torre de Babel. Sí, ese pasaje



Isaac Newton (1643-1727), «unificador» de la mecánica celeste con la mecánica terrestre, retratado por G. Kneller en 1702 (National Portrait Gallery, Wikimedia). James Clerk Maxwell (1831-1879), «unificador» de la luz, la electricidad y el magnetismo

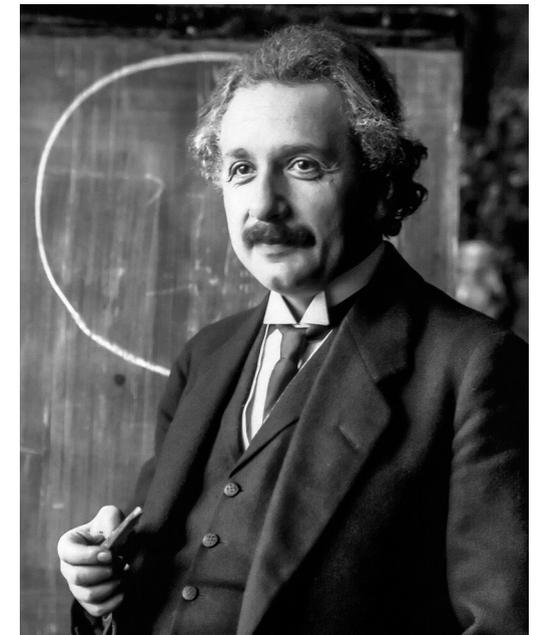
Sin embargo, el amigo Lederman a los que trabajamos en este negocio no nos ha engañado y es su carácter guasón el que aclara lo sucedido. Lo explicado sobre la ira de Dios hace que suene bien lo de *La Partícula Divina*, ésta es la *motivación aparente*. Pero la *verdadera* fue otra muy distinta. *The Goddam Particle* era el título inicialmente propuesto para su libro y como el editor se percató de que con ese nombre las ventas no iban a dar ni para pipas, suprimieron el «dam» de la palabra «goddam» —los que tienen inglés avanzado en su CV saben que significa «maldita»— y todo arreglado. Al final... son tres letras menos, ¡qué más da! Ahora, a vender como churros, a ganar dólares y a confundir al venerable público. Ya se imaginan la cara de los enfurecidos científicos al ver en las portadas de los medios de comunicación a obispos hablando sobre esta partícula, mientras Lederman se tronchaba de risa en su sofá. En los párrafos siguientes veremos por qué «maldita» le pega más que «divina», sin pretender con ello restarle glamour al bendito/maldito bosón.

### 1. Comencemos por su nombre, el de verdad: bosón de Higgs

«Bosón»: se dice de una partícula con spin entero. El spin es una propiedad cuántica de las partículas que no tiene análogo clásico, es decir, que no te puedo explicar diciendo que es *como cuando tiras una pelota y...* No, las pelotas no tienen spin. No hay forma de explicarlo de esa manera. El spin es una especie de giro interno que tienen las partículas, no es un giro físico (como cuando una pelota gira). En la naturaleza se observan partículas con spin cuantizado y múltiplo de  $1/2$ . Cuantizado quiere decir «con valores discretos» y lo del múltiplo se

bíblico en el que a unos humanos poco cautos que juegan a ser Dios la ira divina les hace pagarlo caro, al aparecer diferentes lenguas que los confunden. De ahí la analogía de su propuesta, ya que *la ruptura de la simetría* (del campo de Higgs), que hizo que las partículas adquiriesen masa, diversificó el Universo (lo mismo que ocurrió en la Torre de Babel con las lenguas). Ahora, podemos entender mejor el significado de «la partícula de Dios».

Albert Einstein (1879-1955), formulador de la «Teoría de la Relatividad General» en 1915 (F. Schmutzer, 1921)



entiende bien, puede ser  $0, 1/2, 1, 3/2...$  Característica que, asombrosamente, clasifica a las partículas porque se comportan de una forma extremadamente diferente aquellas que tienen un valor del spin entero ( $0, 1, 2...$ ) y las que lo tienen semientero ( $1/2, 3/2...$ ). A estas últimas se las denomina *fermiones*, como el electrón, porque siguen «la estadística de Fermi-Dirac». Los otros... lo adivinan, ¿verdad?, son los *bosones*, porque siguen «la estadística de Bose-Einstein», como el fotón. Los fermiones forman la materia (gracias a un efecto notable que acontece en las partículas que siguen la estadística de Fermi, el famoso principio de exclusión), mientras que los bosones están normalmente asociados a las fuerzas e interacciones, y tienen propiedades muy distintas. El «bosón-de-Higgs» es un bosón, como un gato es un felino.

Ya he definido someramente qué es un «bosón», por lo tanto, me falta añadir que «de» es una preposición, como sabemos todos, y «Higgs» un científico inglés, Peter W. Higgs, nacido en Newcastle (GB) en 1929. A él se le atribuye haber sido capaz de dar una predicción a la teoría del campo de Higgs hecha por otros (el bosón de Higgs es esa predicción), por lo que ha recibido todo el reconocimiento y la fama. Nadie se acuerda de los pobres Englert, Brout, Hagen... A los que nos dedicamos a la Física de partículas, nos mantuvo entretenidos durante una temporada, en los descansos y cafés de la mañana y la tarde, ver a quién le daban el premio Nobel y los sucesivos intentos de cambiar el nombre de «campo de Higgs» por «campo de Englert-Brout-Higgs». Finalmente, Higgs y François Englert serían los galardonados con el Nobel de Física en 2013.

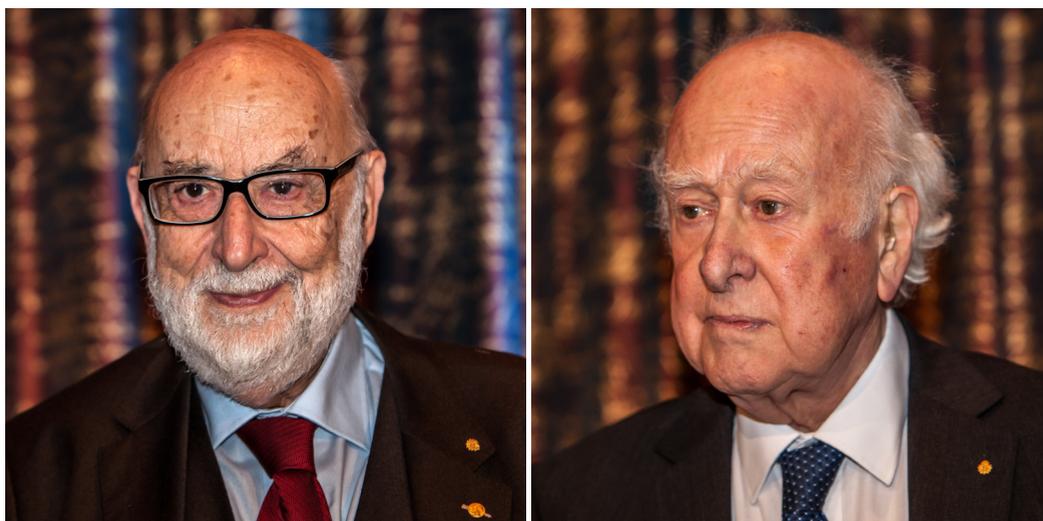
Bien, pero... ¿qué diantre es el bosón de Higgs y por qué se le da tanta importancia?

Seguro que la mayor parte de los lectores, al menos los que han tenido una

infancia feliz, han coleccionado cromos. ¿Te acuerdas de ese álbum con un hueco, ese cromo imposible de conseguir, que al final tenías que llamar a Panini para que te lo enviaran a casa? (hacer eso, ¡qué lo sepas!, es trampa). Daba igual si era un *Pokemon*, que molaba mucho, o un suplente del Écija, el último cromo siempre era algo muy, muy, especial. Pues bien, al ser el bosón de Higgs la última partícula de un *álbum* compuesto por una treintena de ellas y al que llamamos *Modelo Estándar*, lo convierte también en algo muy apreciado. Por supuesto, por razones de mucho más peso que ese motivo casual. El bosón de Higgs es muy notable porque, de una tacada, resuelve dos problemas capitales en Física de partículas: *a)* da explicación al origen de la masa, y *b)* evita que se desmorone el glorificado «Modelo Estándar» de partículas (¡oh, no, todo menos eso!).

### 2. El origen de la masa

Cuando aún no había cumplido 25 años, Isaac Newton (1643-1727) realizó uno de los mayores logros de la historia de la Ciencia: «unificar» la mecánica celeste con la mecánica terrestre. Dicho de otra mane-



François Englert (izq.) y Peter W. Higgs durante la conferencia de prensa en Estocolmo con motivo de haber sido galardonados con el premio Nobel de Física en 2013 (Bengt Nyman, Wikimedia)

ra, supo ver en la caída de una manzana y el movimiento de los astros (los planetas) un mismo principio actor, una fuerza, la gravedad. Y pudo expresarla en forma matemática. Todo un logro. Pero no llegó a entender qué era la gravedad y cómo se producía. Einstein (1879-1955) fue el autor de otra de las grandes revoluciones científicas con su *Teoría de la Relatividad General* en 1915. Con esta teoría, Einstein completó el trabajo de Newton consiguiendo explicar el mecanismo subyacente a la gravedad: una masa deforma el tejido espacio-temporal y el resto de cuerpos responden a esta deformación, dibujando una trayectoria diferente a la que recorrerían en ausencia del cuerpo masivo, trayectoria que es causada por la gravedad y que, en el caso de los planetas, se denomina órbita.

Einstein, aunque explicó cómo funciona la gravedad a través de la deformación del espacio-tiempo provocada por la masa, fue incapaz de decirnos qué otorga la masa a un cuerpo. Algo que Higgs, Englert, Brout y otros científicos, mediante el mecanismo de Higgs, han conseguido aclarar y, por lo tanto, concluir casi 400 años después el trabajo iniciado por Newton: entender la mecánica del Universo. Detengámonos en esta aportación.

## 2.1 ¿Cómo se explica la generación de la masa?

Fijémonos en la famosa Segunda Ley de Newton:  $F=ma$ . La masa es un factor de impedimento a la aceleración. Cuanto mayor es ésta, más fuerza hay que hacer para acelerar un objeto (no es lo mismo acelerar un piano que una pelota).

Ahora, imaginemos una fiesta llena de gente en la que irrumpe el «pequeño Nicolás». Con su peculiar habilidad para escurrirse y ocupar cada hueco se desplaza ágil y sin demasiado impedimento dentro de ella. De repente, llega a esa fiesta Cristiano Ronaldo. Todos quieren acercarse a hacerse una foto con él, por lo que tiene dificultades para moverse por la sala.

Ahora, juntemos ambos conceptos: la masa es un «impedimento» a la aceleración por la acción de un agente, el campo de Higgs. En la analogía de la fiesta, el «campo de Higgs» son los invitados que dificultan la movilidad de Ronaldo. Mientras que una partícula sin masa (como el «pequeño Nicolás») es una partícula de la que *pasa olímpicamente* el «campo de Higgs» o, en terminología científica, con la que no interacciona. Por el contrario, una partícula con masa, como Ronaldo, es una partícula con mucho *feeling*, con *flow*, con el campo de

Higgs o, dicho en terminología científica, con la que interacciona fuertemente. Conseguimos explicar la masa de las partículas a través de una interacción partícula-campo de Higgs. De este modo, el campo de Higgs sería como una energía omnipresente, en cada punto del espacio-tiempo, que no podemos sentir... bueno, sí, lo sentimos a través del peso generado por la masa (¿no les recuerda al famoso y desterrado hace más de 100 años éter o quintaesencia?).

Una analogía que también suele ayudar a entender mejor lo que estamos explicando es la de imaginarse una piscina vacía. ¿Verdad que podrían caminar sin impedimento por ella? Ahora imaginen que la llenamos y con una botella de oxígeno a nuestras espaldas para no asfixiarnos intentamos caminar por el fondo. Ya no es tan fácil. En esta analogía la piscina vacía sería el Universo antes de la *ruptura espontánea de simetría* (antes de que el campo de Higgs entrara en acción) y la piscina con agua sería el Universo con el campo de Higgs funcionando a tope (la canica de la figura de la p. 81 ha caído). El agua que dificulta nuestros movimientos equivaldría, por lo tanto, al campo de Higgs. Pues bien, al igual que al golpear el agua de la piscina se producen olas, si golpeamos fuertemente el campo de Higgs saltan bosones de Higgs (es el cuanto asociado ese campo, al igual que el electrón es el cuanto asociado al campo eléctrico). El lector sabe de sobra que ninguna de estas dos analogías —la de la piscina y la de la fiesta— son perfectas. Ciertos detalles hacen más complicadas las cosas.

## 3. El Modelo Estándar de la Física de partículas

Veamos el segundo problema que resuelve el campo de Higgs. De poco podemos estar

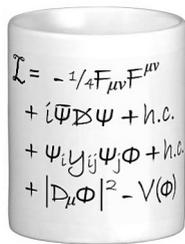
tan orgullosos los físicos de partículas como de nuestro flamante Modelo Estándar. Sí, lo sé, si tan orgullosos estamos ya podríamos haberle puesto un nombre más atractivo, pero es lo que hay. Tengamos en mente que el objetivo último de un físico de partículas es entender el Universo. Ya insistimos antes en que la corriente de pensamiento más extendida es que el Universo tiene que estar regido por leyes y elementos simples. No lo digo yo, lo dicen los físicos más influyentes de la historia, desde Demócrito (h. 460-370 aC) hasta Einstein. En efecto, ya en la Grecia Clásica se pensaba que el Universo podría describirse en términos simples: recordemos cómo Empédocles (h. 490-430 aC) unió los cuatro elementos raíces —Tierra, Fuego, Aire y Agua— mediante dos fuerzas —Amor y Odio—. Esta lucha por la simplicidad es una batalla que hemos ido librando a lo largo de la Historia de la Ciencia.

Una batalla que, en principio, pensándolo fríamente, podría parecer una quimera: miremos a nuestro alrededor, la Tierra y el Universo son una auténtica fiesta de la diversidad. ¿Cómo puede ser que surgieran de un único principio rector cosas tan distintas como el plástico y el diamante, la lechuga y el solomillo, Belén Esteban y Scarlett Johansson? Sin embargo, poco a poco, nos hemos ido acercando a este sueño: Newton *unifica* la mecánica celeste y la gravedad terrestre con su Ley Universal de la Gravitación, estableciendo que la manzana que cae y la Luna que gira alrededor de la Tierra lo hacen siguiendo un mismo principio. James Clerk Maxwell (1831-1879) *unifica* la electricidad y el magnetismo con sus famosísimas cuatro ecuaciones (de Maxwell), la biblia del ingeniero en telecomunicaciones, y, aún más, consigue asociar la luz a una onda electromagnética uniéndolo así también el mundo de la óptica con ellos: luz, electricidad y magnetismo en un mismo principio. Glashow, Salam y

Weinberg describen conjuntamente la «fuerza débil» (responsable de la radioactividad) con la electromagnética, dando lugar a una única fuerza, la electrodébil. Algo parecido ocurre con la «fuerza fuerte», responsable de la formación de núcleos en los átomos. Y todo esto dentro de un único marco, el Modelo Estándar, que parece estar en el buen camino para convertirse en el santo grial del Universo, lo que popularmente llamamos «la teoría final» (¿les recuerda a alguna película?), las teorías de la Gran Unificación (GUT), la respuesta final a todo lo que ocurre, la comprensión última del Universo en toda su extensión. Lo que explica que los físicos, como ese padre repelente que hincha pecho ante los éxitos de su hijo, glorifiquemos el Modelo Estándar y lo luzcamos en todo su esplendor en camisetas, bolígrafos, tazas... ¡Larga vida al Modelo Estándar de física de partículas! Una larga vida que se hubiera visto completamente comprometida si esa partícula, si ese maldito y escurridizo bosón, no hubiese aparecido. ¿Cómo?

Detengámonos un poco más en ver cómo se unifican las teorías y cómo avanzamos en ese camino hacia la teoría única. La niña bonita de nuestras teorías se llama Electrodinámica Cuántica (QED), que es la teoría que unifica la electricidad y el magnetismo. Es el summum del virtuosismo físico, es a la física lo que para los *culés* es Messi. Esta teoría surge al unir dos de las grandes teorías de nuestro tiempo: la relatividad con la cuántica. Es, por lo tanto, una teoría de naturaleza cuántica, pero que además cumple con el principio de relatividad de Einstein, todo un grandísimo logro del intelecto humano en el que participaron grandes científicos del siglo xx.

La QED es una teoría preciosa, simple, elegante, precisa. Lo tiene todo. Con una estructura basada en la simetría consigue explicar cualquier fenómeno relacionado con la electricidad y el magnetismo, así como su relación con las partículas cargadas y la luz, los fotones. Es, por lo tanto, una generalización de la teoría de Maxwell del electromagnetismo, adaptada a los tiempos cuánticos. Según la nueva concepción, las fuerzas, en este caso las electromagnéticas, se producen por el intercambio de una partícula mensajera. Al igual que dos chicos separados por una distancia pueden intercambiar pasándose un balón (el chico-1 retrocede cuando lanza el balón y el chico-2 cuando lo recibe, pues el balón es un agente capaz de transmitir una fuerza y, en este caso, intercambian momento), en la QED, la fuerza electromagnética —digamos— entre dos electrones se debe a que el electrón-1 lanza un fotón (haría de balón) y el electrón-2 lo absorbe. Producto de este intercambio del fotón, los dos electrones registran un cambio en su movimiento, decimos que ha habido una fuerza operando entre ellos.



Lagrangiano del Modelo Estándar, una ecuación que describe todo el Universo y es tan pequeña que cabe en una taza. Las dos últimas filas de términos son el bosón de Higgs. Lagrangiano hace referencia al astrónomo y matemático Lagrange (CERN)

La fuerza electromagnética no es más que un intercambio de fotones. ¿Se atreven a decirme que esta teoría no es bella hasta el extremo? Yo he llorado contemplándola, no puede ser más perfecta.

Esta descripción tiene truco. Tal y como viene descrita viola un principio fundamental: conservación de energía y momento, uno de los pilares de la Física. Pero, el *Principio de incertidumbre de Heisenberg* nos saca del apuro, ya que este principio establece que el Universo puede «hacerse el sueco» durante un tiempo, lapso en el que es posible obviar estas leyes. Lo que

da lugar a un principio básico: ese tiempo será mayor cuanto menor sea la masa de la partícula mensajera. El fotón de la fuerza electromagnética no tiene masa, ergo, la fuerza es de alcance infinito. Sigamos.

#### 4. La radiactividad

En 1896 se observa un nuevo fenómeno que deja perpleja a la comunidad científica: la radiactividad. Es una transmutación de elementos, unos en otros, con envío de partículas (alfa, beta o gamma) de alta energía. Estudios posteriores sobre este fenómeno dieron con una nueva fuerza del Universo, causante de la radioactividad (distinta de las que por entonces se conocían: electricidad, magnetismo y gravedad); a esta fuerza, por ser tan débil (cien mil millones de veces más débil que la electromagnética), la llamaron «fuerza débil». Una de las razones por las que no se había observado anteriormente radicaba —aparte de lo débil que es— en su limitado alcance, no es relevante más allá del entorno del átomo. Y su partícula mensajera, por lo ya comentado, debería ser de vida corta, del orden de  $10^{-25}$  segundos. La reacción lógica de los físicos fue ensayar el mismo método que llevó al éxito rotundo de la QED, pero esta vez con una fuerza muy débil, la fuerza débil. Con ello, quizás, lograrían no sólo describir de forma precisa dicha fuerza, sino además unificarla con la electromagnética, juntarlas en una única fuerza: ¡Éxito!

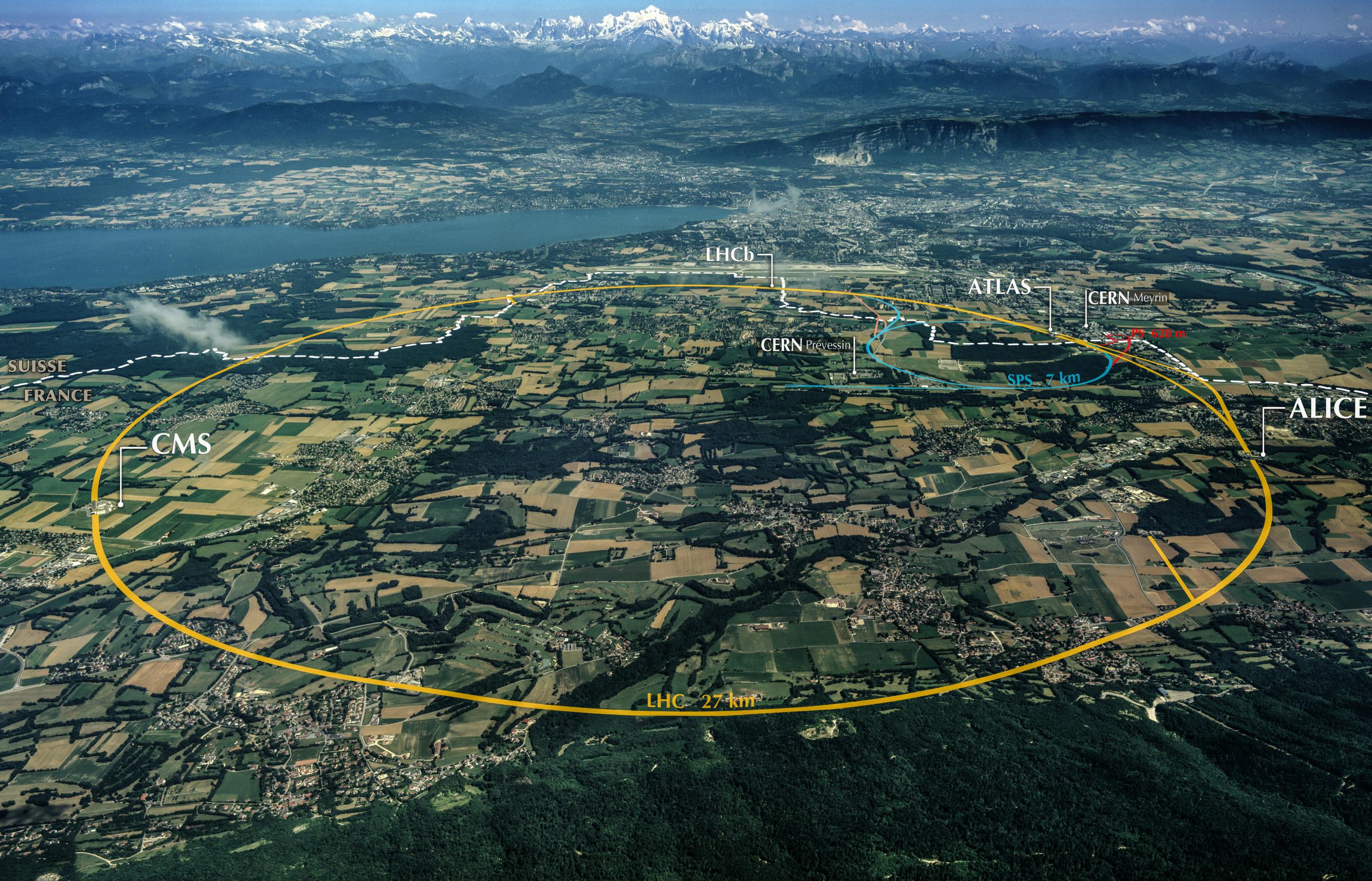
Si han seguido la explicación correctamente se habrán dado cuenta de un pequeño detalle. Si ensayamos una teoría tipo QED para la fuerza débil nos vamos a encontrar con un pequeño impedimento. Querremos que haya una partícula mensajera que haga las veces del balón en la analogía de la barca o del fotón en el caso de QED. Pero como la fuerza débil es una

fuerza de corto alcance, basándonos en el principio de incertidumbre esperamos que sean partículas muy masivas: ¡buscamos bosones parecidos a fotones pero de gran masa! Esta nueva situación planteaba un gran desafío: encontrar estos bosones a los cuales dieron el nombre de W (son dos en realidad, el positivo y el negativo) y Z. Estos bosones fueron finalmente hallados en el CERN en 1982, con una masa que era unas cien veces superior a la del protón. El premio compensaría los esfuerzos, pues si se conseguía describir la fuerza débil podría unificarse con la fuerza electromagnética y formar una gran fuerza del Universo: la «fuerza electrodébil». El mayor problema radica en incluir algo en nuestro modelo que haga que esos bosones tengan masa, porque, ¡qué caramba!, cualquier cosa no vale. Y es que estas teorías tan modernas son más delicadas que un castillo de naipes, en el que cada carta que se coloca hace que se tambalee toda la estructura, maniobra que si no se hace con gran cuidado puede ser fatal; cualquier alteración mínima abre las puertas al infierno, al hacer su aparición *los infinitos*, como ahora veremos.

#### 5. Salvar al Modelo Estándar

La mayor parte de las ecuaciones en Física son irresolubles analíticamente. ¡Ojalá fueran del tipo  $x^2+x-1=0$ ! Pero no son así, aunque por suerte contamos con un método infalible, la «Teoría de perturbaciones». Este método consiste en resolver estas ecuaciones como suma de infinitas aproximaciones: el primer término, el dominante, es una simplificación que se puede calcular; los términos restantes se van haciendo más pequeños pero también son resolubles. Al final, lo que hacemos es calcular los primeros... y cruzar los dedos para que el

Vista aérea del CERN con sus distintas instalaciones, entre ellas, destaca marcada con una línea amarilla el LHC que tiene 27 km (Maximilien Brice, CERN)



LHCb

ATLAS

CERN Meyrin

CERN Prévessin

SPS 7 km

PS 628 m

SUISSE  
FRANCE

CMS

ALICE

LHC 27 km

resto sean suficientemente pequeños como para ignorarlos sin problemas de conciencia. Tenemos, por lo tanto, una serie en la que sumamos infinitos términos. ¿Y qué pasa si esta suma diverge, es decir, se nos va de las manos? Pues que, si no se ha planteado bien el problema, dichas sumas pueden ir incrementando el valor total hasta llegar a dispararse. Son nuestras peores pesadillas, los infinitos. Porque, a nadie se le escapa que a preguntas como «¿cuál es la masa de un electrón?», la respuesta no puede ser «infinito». Si me lo permiten, les robo un término propio del gremio médico para llamar a estos problemillas «patologías», convirtiendo a una teoría así en patológica.

De esta forma los físicos teóricos, los listos, han creado toda una familia de teorías no patológicas que llamamos «renormalizables», con lo que se quiere decir justo eso, libres de infinitos. Las puertas del infierno cerradas. La QED, como pueden imaginar, es una de estas teorías, la niña bonita de nuestras teorías está sana de estos horrores. ¿Y que pasa con la teoría electrodébil que queremos construir? ¿Estará libre de estos infinitos? Si así queremos que sea, habrá que actuar con cuidado, con mucho cuidado, y dar masa a los bosones electrodébiles. Debemos poner la siguiente carta en el castillo de naipes con cariño y sin respirar.

Por suerte tenemos un truco para trabajar con esta familia de teorías renormalizables. Y es usando un principio, el de «simetría gauge». Las teorías con simetría gauge son renormalizables, ¡estamos salvados! Para dar masa a los bosones electrodébiles necesitamos una simetría gauge que incluir en nuestra teoría, así podemos mantener el castillo de naipes erguido y seguir poniendo cartas (por eso también se les llama a los bosones de estas teorías bosones gauge). Aquellos que han comenzado a sudar cuando han leído «simetría gauge», que respiren, el nombre no es relevante y la explicación se

sigue sin necesidad de conocer los detalles de esta simetría. Y lo han adivinado: la forma más simple de dar masa a los bosones electrodébiles, manteniendo la teoría sana y libre de patologías, es el campo de Higgs.

No entraré en pormenores acerca de lo que es una simetría gauge ni de qué tipo de simetría trata el campo de Higgs; lo importante es recalcar que gracias al campo de Higgs conseguimos salvar al Modelo Estándar de lo que parecía un callejón sin salida, y unificamos electricidad, magnetismo y fuerza débil. Aún así... ¿cómo pueden ser tan diferentes la fuerza electromagnética (la que hace que haya luz, electricidad y magnetismo) y la fuerza débil (la de la radioactividad)? Sí, una es intensa y de largo alcance (la electromagnética) y la otra es tan débil y de corto alcance. Sin embargo, no nos impacientemos, tenemos una respuesta, lo que se conoce como *ruptura espontánea de simetría electrodébil* a la que ya nos hemos referido en la p. 81 (el nombre resulta infalible en las reuniones *hipsters*). Porque, claro, con esta simetría fuerza electromagnética y débil son iguales, los fotones y los bosones W y Z también... ¿qué fue lo que ocurrió?, ¿cómo se rompe una simetría?

Algo simétrico es algo que parece igual aunque lo cambies. Por ejemplo, una esfera es simétrica ante rotaciones, ya puedes darle vueltas, sigue habiendo una esfera igual que al principio. Un cubo es simétrico respecto a algunas rotaciones. Si lo rotas un múltiplo de 90 grados, vuelves a tener el mismo cubo. Pero hay formas de romper una simetría de forma adecuada. Imaginen una boda, de esas con mesas de grupo redondas. Todo está perfectamente cuidado, los platos, los cubiertos, los vasos... cada asiento es igual que el otro. ¡Y qué cena es digna sin pan! Y este pan se encuentra justo entre dos comensales, a la misma distancia de sus platos. ¿Cuál es mi pan, el de la derecha, o el de la izquierda? En principio da igual, la

situación es completamente simétrica. Podría coger tanto uno como el otro. Lo mismo ocurre con el resto de comensales, tienen libertad de escoger qué pan es el suyo. Ahora bien, una vez que uno de los comensales se decanta, con uno es suficiente, el resto no tiene elección. Si uno de ellos toma el pan de la derecha todos habrán de coger el de su derecha, si no quieren acabar en una pelea ridícula por el pan. Al elegir derecha o izquierda, en esta situación de perfecta simetría, la estamos rompiendo, aunque la mesa no ha dejado de ser simétrica.

Eso es justo lo que ocurrió con el campo de Higgs. La situación era perfectamente simétrica al inicio del Universo: fotones y bosones W y Z eran iguales y, consecuentemente, las fuerzas electromagnética y débil también lo eran. De repente, al expandirse y enfriarse el Universo, el campo de Higgs se vio desplazado a una posición no simétrica (tuvo que elegir el pan de la izquierda o el de la derecha; en realidad el campo de Higgs tenía infinitos panes para elegir) haciendo que los bosones W y Z adquirieran masa y se diferenciaron del pobre fotón. Electricidad y magnetismo y fuerza débil no volverían a ser iguales nunca más.

### 5.1 El campo de Higgs

Por todo esto, nuestro campo de Higgs es el «2x1» de la Física de Partículas: explica el origen de la masa de las partículas como una interacción con la energía del vacío y, a la vez, salva por los pelos al Modelo Estándar de problemas serios de coherencia. Y si el Universo, ciertamente, contiene esa energía misteriosa, ese campo de Higgs... ¿cómo podemos observarlo? Necesitamos encontrar una forma de demostrarlo. He aquí la mayor contribución de Peter Higgs a este modelo. Al romperse la simetría electrodébil, los bosones W y Z adquieren masa «comiéndose» parte del campo de Higgs. Parte de él, porque los restos de esta

merienda pueden ser detectados, restos que dan lugar a una nueva partícula, característica del campo y que podemos buscar. Algo queda ahí en el vacío, es lo que llamamos el bosón de Higgs, la «maldita» partícula.

Esto, junto al hecho de ser la única partícula del Modelo Estándar a la espera de descubrirse, la convierte en una partícula muy especial. De modo que ahora puede entenderse la importancia de hallarla y los grandes esfuerzos realizados durante más de 50 años por darle caza. Su relevancia y lo escurridiza que ha resultado dan sentido a su nombre de «maldita», mucho más que el de «partícula de Dios». ¡Gracias Lederman!

## 6. El Modelo Estándar salvado

Es una propiedad del espacio vacío en la mecánica cuántica —lo que se llama «vacío cuántico»— que de la nada puedan saltar partículas a la existencia si es por poco tiempo (de nuevo el *Principio de incertidumbre* nos salva, si es muy poco tiempo nos podemos «hacer los suecos»). Esto permite imaginar el vacío como un batiburrillo de partículas que se crean y se destruyen continuamente, son las llamadas «partículas virtuales» (de muy corta existencia). Un mundo muy intenso y muy loco, este vacío cuántico, en el que podemos hacer que estas partículas virtuales cobren vida y salgan de su existencia mísera y efímera, para verlas y medirlas. De esta manera, podríamos ir descubriendo partículas que no forman parte del reparto normal del teatro de la vida en la Tierra (electrones, protones, neutrones, fotones, etcétera) pero que tuvieron papeles destacados al inicio del Universo (muones, kaones, tau, etcétera). Y es que en el vacío cuántico están todas las partículas habidas y por haber, y lo que tenemos que hacer los físicos de partículas es buscar la manera de que salgan de su escondite para estudiarlas.



Al fondo, el Tevatrón, llamado así porque inicialmente alcanzaba una energía de 1 TeV (=10<sup>12</sup> electronvoltios), y, en primer plano, el inyector principal. Los estanques circulares que rodean a ambos ayudan a disipar el calor (Reidar Hahn, Fermilab, US Department of Energy)

La forma ingeniosa que tenemos de hacerlo es a lo bruto: colisionando.

Es por esto por lo que, continuamente, durante el siglo XX, se han ido construyendo aceleradores capaces de golpear este vacío cuántico y ver nuevas partículas. Y para conseguir que dichas partículas salgan de su escondite y tomen vida hay que darles energía. Cuanto más masa tenga una partícula, más energía hay que darle, eso es lógico y es una consecuencia de la que es posiblemente la ecuación más famosa de la historia:  $E=mc^2$ . Energía y masa son equivalentes, para poder producir una partícula de una determinada masa, primero hay que «pagar» por ella con suficiente energía. Mientras más masiva sea la partícula, tanta más energía tengo que proporcionar.

Así, con los primeros aceleradores (ciclotrones), del tamaño de la palma de una mano, apenas se generaba energía para producir las partículas más ligeras, los electrones y muones. Al ir aumentando de tamaño los aceleradores se han ido logrando energías mayores. Con los sincrociclotrones, del tamaño de una habitación, comenzaban a explorarse energías mayores e iban apareciendo nuevas partículas. Con ellos íbamos mejorando nuestra comprensión del Universo y aproximándonos a una posible teoría final. A mitad del siglo XX empezaron a proliferar los aceleradores de partículas en todo el mundo, gracias a una nueva tecnología, los sincrotrones, que iban compitiendo en su capacidad de generar energía, lo que multiplicaba los descubrimientos de

nuevas partículas aquí y allí. Era la *época dorada de la física de partículas*, no era raro ver a un joven estudiante correr por los pasillos proclamando el descubrimiento de una nueva partícula.

Los aceleradores no paraban de crecer, ya no eran pequeños experimentos de sala, sino grandes aceleradores que contaban con equipos técnicos de decenas de personas. Los premios Nobel se sucedían con cada experimento. Y teoría y experimentación, de la mano, iban conformando una teoría física de gran calado, el Modelo Estándar. Ya se imaginan ese álbum de cromos, *El Modelo Estándar*, cómo se iba completando con los descubrimientos sucesivos según se disponía de más energía: los *quark strange, charm y bottom*, el tau, los neutrinos muónico, electrónico y tau, sus antipartículas, etcétera. En

1982 el equipo de Carlo Rubbia (Nobel de Física en 1984) en el CERN descubrió el bosón W y, seguidamente, caza al Z, gracias a un acelerador de 27 km de longitud, el LEP (*Large Electron-Positron Collider*).

En 1995 en el Fermilab de Batavia (Illinois, EEUU), gracias a su Tevatrón, un sincrotrón de 6,3 km (véase foto), se alcanzaron energías de unas mil veces la masa del protón, produciendo suficientes *quark top* como para permitir su descubrimiento. La energía de colisión era inmensa. Protones chocaban continuamente con antiprotones y desprendían partículas de su falsa existencia en el vacío cuántico para hacerlas realidad, tangibles, medibles.

Estamos en 2010 y el Tevatrón, después de sucesivas mejoras continúa operando, ya es capaz de generar una energía récord de 2 TeV, pero sigue sin aparecer esa partícula.

Esa maldita partícula. Han pasado más de 40 años desde que Peter Higgs predijera su existencia, sin embargo, nadie consigue dar con ella, ni siquiera en el Fermilab. Y el gobierno americano tira la toalla, su colisionador no puede generar la suficiente energía, ni las suficientes colisiones, como para observar ese maldito bosón. La teoría no predice su masa, que debe andar, si es que existe y por consistencia, entre los 100 GeV y los 700 GeV (1 GeV=10<sup>9</sup> electronvoltios, símbolo eV, lo que representa aproximadamente la masa de un protón). Muchos científicos empiezan a dudar de su existencia, pues la dichosa partícula sigue sin aparecer. Todas las esperanzas se ponen en un experimento que comienza en 2009, el Gran Colisionador de Hadrones (*Large Hadron Collider, LHC*), instalado en el CERN (véase foto pp. 88 y 89), que hace chocar protones con más energía y en mayor número que en el Tevatrón. Y la comunidad científica coincide en que es *ahora o nunca*.

## 7. ¡Te tenemos!

El 4 de junio de 2012, el auditorio principal del CERN está a rebosar. Los más jóvenes incluso acamparon la noche anterior para conseguir un sitio y ser testigos de un hito histórico. En primera fila, François Englert y Peter Higgs, dos de los padres de la teoría que siguen vivos. Lo que había corrido como un rumor por pasillos y despachos de la institución ginebrina durante meses iba a ser confirmado. Finalmente, después de millones de euros invertidos, varias generaciones de científicos dedicados a ello, miles de técnicos e investigadores y más de 40 años de intentos fallidos, sueños rotos, discusiones, apuestas, falsos rumores y eterna espera, al fin, sí, al fin, ¡te tenemos, maldita partícula!

