



La partícula
al final del universo
Sean Carroll

Del bosón de Higgs
al umbral de un nuevo mundo

DEBATE

La partícula al final del universo

Del bosón de Higgs al umbral de un nuevo mundo

SEAN CARROLL

Traducción de
Marcos Pérez Sánchez

DEBATE

www.megustaleerebooks.com

*Para mi madre,
que me llevaba a la biblioteca*

La gente subestima el impacto que una nueva realidad puede tener.

JOE INCANDELA, portavoz del experimento CMS
en el Gran Colisionador de Hadrones

Prólogo

JoAnne Hewett siente vértigo, pero no deja de sonreír ni por un momento mientras habla entusiasmada ante una cámara de vídeo. Los asistentes a la fiesta en el consulado suizo de San Francisco hacen mucho ruido. La ocasión es muy especial: celebran que los primeros protones han empezado a circular por el túnel subterráneo del Gran Colisionador de Hadrones (LHC, Large Hadron Collider), a las afueras de Ginebra; un enorme acelerador de partículas situado en la frontera entre Francia y Suiza que ha comenzado su andadura para desentrañar los secretos del universo. Corre el champán, y no es de extrañar. La voz de Hewett se eleva enfática: «Llevo esperando este día vein-ti-cin-co años».

Es un momento importante. A estas alturas, en 2008, los físicos por fin han obtenido lo que llevaban tanto tiempo pidiendo para dar el siguiente gran paso adelante: un acelerador de partículas gigante que haga chocar entre sí protones de muy alta energía. Hubo un tiempo en que pensaron que lo construiría Estados Unidos, pero las cosas no salieron como se esperaba. Hewett estaba empezando su doctorado, en 1983, cuando el Congreso estadounidense aprobó la construcción en Texas del Supercolisionador Superconductor (SSC, Superconducting Super Collider). Estaba previsto que entrase en funcionamiento antes del año 2000, y habría sido el mayor colisionador jamás construido. Hewett, como tantos otros físicos brillantes y ambiciosos de su generación, pensaba que los descubrimientos que se realizarían en él constituirían los cimientos de sus carreras como investigadores.

Pero el SSC se canceló, lo que supuso una tremenda decepción para los físicos que confiaban en que serviría para marcar la dirección en que su disciplina evolucionaría en las décadas venideras. La política, la burocracia y las luchas internas lo impidieron. Ahora, el LHC, similar en muchos sentidos a como habría sido el SSC, está a punto de ponerse en marcha por primera vez, y Hewett

y sus colegas están más que preparados para ello. «Durante los últimos veinticinco años, me he dedicado a tomar cualquier teoría que se propusiese, por disparatada que fuera, y calcular su signatura (la manera en que identificamos nuevas partículas) en el SSC o en el LHC.»

Existe otra razón más personal para explicar el vértigo que siente ahora Hewett. En el vídeo, lleva el pelo muy corto, casi rapado al cero. No es por capricho: unos meses antes, le diagnosticaron un cáncer de mama invasivo, y tenía alrededor de un 20 por ciento de probabilidades de que fuese terminal. Optó por un tratamiento muy agresivo, que incluía duras sesiones de quimioterapia y una sucesión en apariencia interminable de operaciones. Su característica melena pelirroja, que normalmente le caía hasta la cintura, desapareció enseguida. Había veces, reconoce entre risas, en que para mantener la moral alta pensaba en las nuevas partículas que encontrarían en el LHC.

JoAnne y yo nos conocemos desde hace años, somos colegas y amigos. Mi experiencia profesional se limita principalmente a la cosmología, el estudio del universo en su conjunto, un campo que ha entrado recientemente en una era dorada de datos nuevos y descubrimientos sorprendentes. La física de partículas, que, como disciplina intelectual, ha acabado siendo inseparable de la cosmología, sin embargo ha echado en falta nuevos resultados experimentales que sacudiesen el panorama teórico y nos permitiesen avanzar hacia nuevas ideas. La presión ha ido aumentando desde hace mucho tiempo. A otro de los físicos que asiste a la fiesta, Gordon Watts, de la Universidad de Washington, le preguntaron si la larga espera hasta la llegada del LHC había sido estresante. «Sí, totalmente. Mi mujer dice que este mechón de pelo gris que tengo es culpa de mi hijo, pero en realidad es por el LHC.»

La física de partículas está a punto de entrar en una nueva era, en la que algunas teorías se derrumbarán con estrépito y quizá se confirme que alguna de ellas es correcta. Cada uno de los físicos que está en la fiesta tiene su propio modelo favorito: bosones de Higgs, supersimetría, tecnicolor, dimensiones adicionales, materia oscura, una amplia variedad de ideas exóticas con

repercusiones fantásticas.

«Lo que espero es que el LHC no encuentre “ninguna de las anteriores” — dice Hewett con entusiasmo—. Sinceramente, creo que va a ser una sorpresa, porque la naturaleza es más inteligente que todos nosotros y aún nos reserva unas cuantas sorpresas. Vamos a disfrutar de lo lindo tratando de entenderlo todo. ¡Va a ser estupendo!»

Pero eso fue en 2008. En 2012, la fiesta en San Francisco para celebrar la inauguración del LHC ha terminado, y la era de descubrimientos ya ha dado comienzo oficialmente. Su melena ha resurgido. El tratamiento fue agotador, pero parece que ha dado resultado. Y el experimento que llevaba toda su carrera esperando está haciendo historia. Tras dos décadas y media dedicada a la teoría, sus ideas por fin se están poniendo a prueba con datos reales, de partículas e interacciones que el ser humano nunca antes había visto, sorpresas que la naturaleza nos había estado reservando... Hasta ahora.

Demos un salto en el tiempo hasta el 4 de julio de 2012, jornada inaugural de la Conferencia Internacional sobre Física de Altas Energías. Es una reunión bianual, que se celebra cada vez en una ciudad diferente. Este año tiene lugar en Melbourne, en Australia. Cientos de físicos de partículas, incluida Hewett, llenan el auditorio principal para asistir a un seminario especial. Toda la inversión realizada en el LHC, todas las expectativas que se han creado a lo largo de los años, están a punto de dar sus frutos.

El seminario se retransmite desde el CERN, el laboratorio en Ginebra donde está ubicado el LHC. Hay dos presentaciones, que en otras circunstancias se habrían celebrado en Melbourne como parte del programa de conferencias. Pero, en el último minuto, los poderes fácticos decidieron que un momento de tal trascendencia se debía compartir con todas las personas que habían contribuido al éxito del LHC. El gesto era de agradecer: cientos de físicos hicieron cola en el CERN durante horas para poder asistir a las conferencias, cuyo inicio estaba previsto a las nueve de la mañana, haciendo noche con sus sacos de dormir para tratar de conseguir un buen sitio.

Rolf Heuer, director general del CERN, se encarga de presentar a los conferenciantes: el físico estadounidense Joe Incandela y la física italiana Fabiola Gianotti, portavoces de los dos grandes experimentos que recopilan y analizan los datos del LHC. En cada uno de los experimentos colaboran más de tres mil físicos, la mayoría de los cuales están pegados a las pantallas de sus ordenadores en diversos rincones del planeta. El acontecimiento se está retransmitiendo en directo por internet, no solo a Melbourne, sino para todo aquel que, en cualquier lugar del mundo, quiera conocer los resultados en tiempo real. Es el medio apropiado para esta celebración de la Gran Ciencia moderna: un proyecto internacional con mucho en juego y que promete ofrecernos recompensas estimulantes.

En las palabras tanto de Gianotti como de Incandela queda patente cierta tensión nerviosa, pero las presentaciones hablan por sí solas. Ambos ofrecen su sincero agradecimiento a todos los ingenieros y científicos que han contribuido a hacer posibles los experimentos. A continuación, explican en detalle por qué habríamos de confiar en los resultados que están a punto de presentar, dejando patente que entienden cómo funcionan sus aparatos y que el análisis de los datos es preciso y fiable. Solo después haber preparado meticulosamente el escenario nos revelan lo que han averiguado.

Ahí está: un puñado de gráficos en los que un ojo inexperto no vería gran cosa, pero con una característica recurrente: más eventos (recolección de partículas provenientes de una única colisión) de los esperados a una determinada energía en particular. Todos los físicos que se encuentran entre el público saben de inmediato lo que eso significa: una nueva partícula. El LHC ha vislumbrado una parte de la naturaleza que hasta ahora nunca nadie había visto. Incandela y Gianotti repasan el concienzudo análisis estadístico que se ha llevado a cabo con el objetivo de separar los descubrimientos reales de las inoportunas fluctuaciones estadísticas, y los resultados en ambos casos no dejan margen a la ambigüedad: esto es algo real.

Aplausos. En Ginebra, en Melbourne, en todo el mundo. Los datos son tan

precisos y claros que incluso algunos científicos que trabajaron durante años en los experimentos están sorprendidos. Lyn Evans, el físico galés responsable, más que ninguna otra persona, de haber llevado el LHC a buen puerto tras una azarosa travesía, reconoció que estaba «alucinado» por el extraordinario grado de concordancia entre los dos experimentos.

Ese día yo también estaba en el CERN, haciéndome pasar por periodista en una sala de prensa próxima al auditorio. Se supone que los periodistas no deben aplaudir ante los acontecimientos que cubren, pero los reporteros allí congregados nos dejamos llevar por la emoción del momento. El éxito no era solo del CERN, o de la física. Era un éxito de toda la humanidad.

Creemos que sabemos qué es lo que hemos encontrado: una partícula elemental denominada «bosón de Higgs», en honor del físico británico Peter Higgs, que se encontraba en la sala donde se celebraron los seminarios. A sus ochenta y tres años, estaba visiblemente emocionado: «Nunca imaginé que llegaría a ver esto». También estaban presentes otros físicos veteranos que habían propuesto la misma idea en 1964. Las convenciones que se siguen para darles nombre a las teorías no siempre son justas, pero en ese momento todos podían sumarse a la celebración.

¿Qué es el bosón de Higgs? Es una de las partículas fundamentales de la naturaleza, que no son tantas. De hecho, se trata de un tipo de partícula muy especial. La física de partículas moderna contempla tres tipos de partículas: las partículas de materia, como los electrones y los quarks, que constituyen los átomos que forman todo lo que vemos a nuestro alrededor; las partículas de fuerza que transmiten la gravedad, el electromagnetismo y las fuerzas nucleares, que mantienen unidas las partículas de materia; y luego está el Higgs, único en su categoría.

El Higgs no es importante por lo que hace, sino por lo que es. La partícula de Higgs surge de un campo que se extiende por todo el espacio, conocido como el «campo de Higgs». Todas las cosas que existen en el universo visible, cuando se mueven en el espacio se desplazan a través del campo de Higgs, que siempre

esta ahí, en un discreto segundo plano. Pero es importante: sin el Higgs, los electrones y los quarks no tendrían masa, como los fotones, las partículas de luz. Se moverían también a la velocidad de la luz, la formación de átomos y moléculas sería imposible, no digamos ya la existencia de vida tal y como la conocemos. El campo de Higgs no es un agente activo en la dinámica de la materia ordinaria, pero su presencia en segundo plano es fundamental. Sin él, el mundo sería un lugar completamente distinto. Y lo hemos encontrado.

Sin embargo, conviene ser prudentes. Lo que tenemos entre manos en realidad son evidencias de una partícula muy parecida al Higgs. Tiene la masa adecuada y se produce y se desintegra aproximadamente como cabía esperar. Pero aún es pronto para asegurar que lo que hemos descubierto es sin lugar a dudas el Higgs sencillo que predicen los modelos originales. Podría tratarse de algo más complicado, o formar parte de una compleja red de partículas interrelacionadas. De lo que no cabe duda es de que hemos encontrado una nueva partícula, que se comporta como creemos que debería hacerlo el Higgs. En este libro, tomaremos el 4 de julio de 2012 como el día en que se anunció el descubrimiento del bosón de Higgs. Si se acaba demostrando que la realidad es más sutil, mucho mejor para todos: a los físicos nos encantan las sorpresas.

Hay muchas esperanzas depositadas en que el descubrimiento del Higgs represente el comienzo de una nueva era en la física de partículas. Sabemos que hay física más allá de lo que entendemos a día de hoy, y el estudio del bosón de Higgs nos permite asomarnos a mundos aún por explorar. Los físicos experimentales como Gianotti e Incandela tienen un nuevo espécimen que estudiar; los teóricos como Hewett disponen de nuevas pistas a partir de las cuales construir mejores modelos. Hemos dado un gran paso adelante en la comprensión del universo, algo que llevábamos mucho tiempo esperando.

Esta es la historia de las personas que han dedicado sus vidas a descubrir la naturaleza última de la realidad, de la que el Higgs es un componente esencial. Entre ellos están los teóricos, armados de lápiz y papel, y animados a base de café y de acaloradas discusiones con sus colegas, dándole vueltas en sus cabezas

a ideas abstractas. Están también los ingenieros, que empujan las máquinas y la electrónica mucho más allá de los límites de la tecnología actual. Y, sobre todo, están los experimentalistas, que combinan máquinas e ideas para descubrir nuevos aspectos de la naturaleza. En la física puntera moderna los proyectos cuestan miles de millones de euros y tardan décadas en completarse; son proyectos que exigen una extraordinaria dedicación y estar en disposición de hacer fuertes apuestas que prometen recompensas incomparables. Cuando se dan todas estas condiciones, el mundo se transforma.

La vida nos sonrío. Sírvase otra copa de champán.

La idea

Donde nos preguntamos por qué un grupo de personas con talento y ambición dedicarían sus vidas a la búsqueda de cosas tan pequeñas que no se ven.

La física de partículas es una actividad peculiar. Miles de personas dedican miles de millones de dólares a construir máquinas gigantes de varios kilómetros de diámetro, que lanzan partículas subatómicas a velocidades próximas a la de la luz y hacen que choquen entre sí, todo para descubrir y estudiar otras partículas subatómicas cuya repercusión sobre las vidas cotidianas de quienes no se dedican a la física de partículas es prácticamente nula.

Al menos, esa es una forma de entenderlo. Esta es otra: la física de partículas es la manifestación más pura de la curiosidad humana por el mundo en el que vivimos. Los seres humanos siempre nos hemos hecho preguntas y, desde la antigua Grecia, hace más de dos mil años, el impulso de explorar se ha transformado en un proyecto sistemático y de alcance mundial para descubrir las reglas básicas que rigen el funcionamiento del universo. La física de partículas surge directamente de nuestro insaciable deseo de entender el mundo: lo que nos motiva no son las partículas, sino el deseo humano de comprender lo que no entendemos.

Los primeros años del siglo XXI suponen un punto de inflexión. El último resultado experimental realmente sorprendente obtenido en un acelerador de partículas se produjo en la década de 1970, hace más de treinta y cinco años. (La fecha precisa depende de lo que cada uno entienda por «sorprendente».) No es

porque los experimentalistas se hayan pasado todo este tiempo dormitando frente a sus aparatos, ni mucho menos. Las máquinas han mejorado a pasos agigantados y nos han permitido llegar a ámbitos que hasta hace bien poco parecían inalcanzables. El problema es que no han visto nada que no esperásemos encontrar de antemano. Para los científicos, que siempre anhelan una buena sorpresa, esto es algo extremadamente molesto.

El problema, dicho de otro modo, no es que los experimentalistas no hayan estado a la altura, es que la teoría era demasiado buena. En el mundo especializado de la ciencia moderna, la brecha entre los roles de «experimentalistas» y «teóricos» ha ido creciendo, en particular en la física de partículas. Lejos quedan ya los días en que un genio como el físico italiano Enrico Fermi podía proponer una nueva teoría de las interacciones débiles y, sin solución de continuidad, dirigir la construcción del reactor donde se produciría la primera reacción nuclear en cadena artificial autosostenible. Hoy en día, los teóricos de partículas garabatean en sus pizarras las ecuaciones que acabarán dando lugar a modelos específicos, modelos que pondrán a prueba los experimentalistas, que recopilan datos con máquinas de una precisión exquisita. Los mejores exponentes del campo teórico están muy al día de los experimentos, y viceversa, pero no existe nadie capaz de dominar ambos ámbitos.

Durante la década de 1970, la mejor teoría de la física de partículas de que disponemos recibió sus últimos retoques. Esta teoría responde al anodino nombre de «Modelo Estándar», y es la que describe los quarks, los gluones, los neutrinos y cualquier otra partícula de la que el lector haya oído hablar. Como los famosos de Hollywood o los políticos carismáticos, elevamos las teorías a un pedestal para poder despedazarlas mejor. En física, uno no se hace famoso por demostrar que la teoría que otra persona propuso es correcta, sino por poner en evidencia cuáles son sus fallos, o por proponer una mejor.

Pero el Modelo Estándar es obstinado. Durante décadas, cada uno de los experimentos que hemos podido llevar a cabo aquí en la Tierra ha confirmado diligentemente sus predicciones. Toda una generación de físicos de partículas ha

ido ascendiendo por el escalafón académico, de estudiantes a catedráticos, sin disponer de un solo fenómeno nuevo que poder descubrir o explicar. La espera ha llegado a hacerse prácticamente insoportable.

Todo esto está cambiando. El Gran Colisionador de Hadrones, donde chocan partículas a energías que la humanidad nunca antes había alcanzado, representa una nueva era para la física. Pero no es solo que la energía sea más elevada. Se trata de una energía con la que llevamos años soñando, donde esperamos encontrar nuevas partículas que la teoría predice y, con suerte, alguna que otra sorpresa: es la energía donde la fuerza conocida como «interacción débil» oculta sus secretos.

Hay mucho en juego. Nos asomamos a lo desconocido y puede suceder cualquier cosa. Infinidad de modelos teóricos compiten entre sí por predecir lo que el LHC encontrará. No sabemos lo que habrá allí hasta que miremos. En el centro de todas las especulaciones se encuentra el bosón de Higgs, una humilde partícula que representa tanto la última pieza del Modelo Estándar como el primer atisbo del mundo que existe más allá del mismo.

UN GRAN UNIVERSO COMPUESTO DE PEQUEÑAS PIEZAS

Junto a la costa del Pacífico, en el sur de California, a una hora y media en coche de Los Ángeles, donde vivo, existe un lugar mágico donde los sueños se hacen realidad: Legoland. En Dino Land, Fun Town y otras atracciones, los niños se maravillan ante un mundo intrincado construido a base de Lego, esos pequeños bloques de plástico que se pueden ensamblar en infinitas combinaciones.

Legoland se parece mucho al mundo real. En cualquier momento dado, el mundo que nos rodea contiene normalmente todo tipo de sustancias: madera, plástico, tejidos, cristal, metal, aire, agua, cuerpos de seres vivos. Objetos de todo tipo, con propiedades muy diversas. Pero, cuando las miramos más de cerca, descubrimos que esas sustancias en realidad no son tan distintas entre sí.

Son simplemente distintas maneras de organizar una pequeña cantidad de bloques fundamentales: las partículas elementales. Como los edificios de Legoland, las mesas, los coches y las personas son ejemplos de la asombrosa diversidad que se puede lograr a partir de un reducido número de piezas sencillas que pueden combinarse de diversas formas. El tamaño de un átomo es aproximadamente una billonésima parte del de una pieza de Lego, pero los principios son similares.

La idea de que la materia está compuesta de átomos nos parece de lo más natural. Es algo que aprendemos en el colegio, mientras hacemos experimentos en aulas en cuyas paredes cuelga la tabla periódica de los elementos. Es fácil perder de vista lo asombroso que es este hecho. Hay cosas duras y cosas blandas; cosas ligeras y cosas pesadas; cosas líquidas, sólidas y gaseosas; cosas transparentes y opacas; cosas vivas y otras que no lo están. Pero, bajo la superficie, todas esas cosas están en realidad compuestas del mismo tipo de materia. En la tabla periódica figuran alrededor de un centenar de átomos, y todo lo que nos rodea no es más que una combinación de ellos.

La confianza en la idea de que podemos entender el mundo a partir de unos pocos ingredientes básicos viene de lejos. En la Antigüedad, varias culturas distintas (babilonios, griegos o hindúes, entre otros) inventaron un conjunto sorprendentemente consistente de cinco «elementos», de los que estaban compuestos todos los objetos. Los que nos resultan más familiares son la tierra, el aire, el fuego y el agua, pero había también un quinto elemento celestial: el éter o quintaesencia. (Sí, de ahí viene el nombre de la película de Bruce Willis y Milla Jovovich, *El quinto elemento*.) Como sucede con muchas otras ideas, fue Aristóteles el que desarrolló a partir de ella un elaborado sistema, según el cual cada elemento tendía a su estado natural particular: por ejemplo, la tierra tiende a caer y el aire a ascender. Mezclando los elementos en distintas combinaciones, podemos obtener las distintas sustancias que vemos a nuestro alrededor.

Demócrito, un filósofo griego anterior a Aristóteles, afirmó que todo lo que conocemos está compuesto por diminutas piezas indivisibles, que llamó

«átomos». Por un desafortunado accidente de la historia, John Dalton, un químico de principios del siglo XIX, se sirvió de esta terminología para referirse a las partes que definen los elementos químicos. Hoy en día sabemos que los átomos no son en absoluto indivisibles: constan de un núcleo compuesto por protones y neutrones, alrededor del cual orbita un conjunto de electrones. Ni siquiera los protones y los neutrones son indivisibles, pues están a su vez compuestos por piezas aún más pequeñas denominadas «quarks».

Los quarks y los electrones son los verdaderos átomos, en el sentido de elementos indivisibles de la materia que el término tenía para Demócrito. Hoy en día los llamamos «partículas elementales». Los protones y neutrones del núcleo atómico están formados por dos tipos de quarks, conocidos juguetonamente como «up» («arriba») y «down» («abajo»). De manera que, a fin de cuentas, nos basta con tres partículas elementales para formar cualquier pedazo de la materia que percibimos directamente a nuestro alrededor: electrones, quarks up y quarks down. Un avance respecto a los cinco elementos de la Antigüedad, y una gran mejora respecto a la tabla periódica.

Pero reducir el mundo a tan solo tres partículas es un poco excesivo. Aunque los electrones y los quarks up y down nos bastan para dar cuenta de los coches, los ríos y los cachorros, no son las únicas partículas que hemos descubierto. De hecho, existen doce tipos distintos de partículas de materia: seis quarks, sujetos a la interacción fuerte y confinados dentro de conjuntos más amplios, como los protones y los neutrones, y seis «leptones», que pueden desplazarse independientemente por el espacio. También tenemos las partículas portadoras de las fuerzas, que los mantienen unidos en las diferentes combinaciones que vemos. Sin las partículas de fuerza, el mundo sería un lugar muy aburrido: las partículas individuales se moverían por el espacio únicamente en línea recta, y nunca interaccionarían entre sí. El conjunto de ingredientes que necesitamos para explicar todo lo que vemos a nuestro alrededor es bastante reducido, pero la verdad es que podría serlo aún más. A los físicos de partículas modernos les

mueve el deseo de conseguir hacerlo mejor.

EL BOSÓN DE HIGGS

El Modelo Estándar de la física de partículas consiste en: doce partículas de materia, más un grupo de partículas transmisoras de las fuerzas que las mantienen unidas. No es la representación más pulcra del mundo, pero concuerda con todos los datos. Hemos reunido todas las piezas que necesitamos para describir satisfactoriamente el mundo que nos rodea, al menos aquí en la Tierra. Tenemos evidencia de que en el espacio existen cosas como la materia oscura y la energía oscura, que, por si acaso hiciera falta, nos recuerdan obstinadamente que aún nos quedan muchas cosas por entender. Porque el Modelo Estándar no las explica.

En general, el Modelo Estándar se divide nítidamente entre partículas de materia y partículas portadoras de las fuerzas. El bosón de Higgs es diferente. Esta partícula, que debe su nombre a Peter Higgs, una de las personas que propusieron la idea en la década de 1960, es una especie de patito feo. Técnicamente, es una partícula transmisora de fuerza, pero distinta de las que estamos más acostumbrados a encontrarnos. Desde el punto de vista de un físico teórico, el Higgs parece un añadido arbitrario y caprichoso a una estructura por lo demás hermosa. Si no fuese por el bosón de Higgs, el Modelo Estándar sería el paradigma de la elegancia y la virtud; en cambio, con él, es un lío. Y encontrar al culpable del desaguisado no ha resultado ser una tarea sencilla.

Entonces, ¿por qué tantos físicos estaban convencidos de que tenía que existir el bosón de Higgs? El lector oirá explicaciones como: «para proporcionar masa a otras partículas» y «para romper simetrías». Ambas son ciertas, pero no es fácil hacerse una idea rápida de lo que significan. Lo fundamental es que, sin el bosón de Higgs, el Modelo Estándar tendría un aspecto muy diferente y no se parecería en nada al mundo real. Con el bosón de Higgs, encaja perfectamente.

Los físicos teóricos intentaron por todos los medios encontrar teorías que no incorporasen un bosón de Higgs, o en las que el bosón fuese muy distinto del que predice el Modelo Estándar. Muchas de estas teorías no superaron la prueba de la confrontación con los datos, y otras eran innecesariamente complicadas. Ninguna parecía aportar una verdadera mejora.

Y ahora hemos encontrado el Higgs. O algo que se le parece mucho. Dependiendo del cuidado que pongan al referirse a él, los físicos dirán cosas como: «Hemos descubierto el bosón de Higgs», o «Hemos descubierto una partícula de tipo Higgs, o incluso «Hemos descubierto una partícula que se parece al Higgs». El anuncio del 4 de julio describía una partícula que se comporta de forma muy parecida a como se supone que debería hacerlo el Higgs: se desintegra en otras partículas aproximadamente de la manera en que esperábamos que lo hiciera. Pero aún es pronto y, mientras seguimos recopilando datos, queda mucho margen para la sorpresa. Los físicos no quieren que sea el Higgs que todos esperamos; siempre es más interesante y divertido encontrar algo inesperado. En los datos actuales hay pequeños indicios de que la nueva partícula podría no ser exactamente el Higgs que esperamos. Solo saldremos de dudas con más experimentos.

POR QUÉ ES IMPORTANTE

Una vez me hicieron una entrevista sobre física de partículas, gravitación, cosmología y demás en una radio local. Era 2005 y se cumplía el centenario de 1905, el «año milagroso» de Albert Einstein, cuando publicó un conjunto de artículos que pusieron patas arriba el mundo de la física. Hice lo que pude para explicar algunos de esos abstractos conceptos, gesticulando con las manos, algo que no puedo evitar hacer ni siquiera cuando sé que estoy en la radio.

El entrevistador parecía contento, pero, cuando ya habíamos terminado y mientras recogía su equipo de grabación, se le encendió una bombilla en la

cabeza. Me preguntó si le podría responder a una pregunta más. Por supuesto, le dije, y volvió a sacar el micrófono y los auriculares. La pregunta era sencilla: «¿Por qué habría de importarle a alguien todo esto?». Al fin y al cabo, no iba a ayudarnos a encontrar la cura del cáncer, ni a fabricar un teléfono inteligente más barato.

La respuesta que se me ocurrió entonces me sigue pareciendo razonable: «A los seis años, todo el mundo hace preguntas como esta. ¿Por qué el cielo es azul? ¿Por qué caen las cosas? ¿Por qué unas cosas están frías y otras calientes? ¿Cómo funciona todo esto?». No tenemos que aprender a interesarnos por la ciencia: los niños son científicos natos. Todos esos años que pasamos formándonos y las presiones de la vida real acaban con esa curiosidad innata. Empezamos a preocuparnos por conseguir trabajo, conocer a alguien especial, criar a nuestros hijos; dejamos de preguntarnos cómo funciona el mundo y empezamos a preguntarnos cómo podemos hacer que nos funcione a nosotros. Más tarde encontré estudios que demostraban que a nuestros hijos les encanta la ciencia hasta que alcanzan edades de entre diez y catorce años.

Hoy en día, después de más de cuatrocientos años dedicados concienzudamente a la aventura de la ciencia, tenemos muy pocas respuestas que darle al niño de seis años que llevamos dentro. Sabemos tanto sobre el mundo físico que las preguntas aún sin respuesta tenemos que encontrarlas en lugares remotos y ambientes extremos. Así es en la física, al menos; en campos como la biología o la neurociencia no es difícil encontrar preguntas cuyas respuestas aún se nos escapan. Pero la física —al menos el subcampo de la física «fundamental», que estudia los elementos básicos que constituyen la realidad— ha hecho que avance tanto el horizonte de nuestra comprensión que necesitamos construir aceleradores y telescopios gigantes para recopilar nuevos datos que no encajen con nuestras teorías actuales.

Una y otra vez a lo largo de la historia de la ciencia, la investigación básica —la que se lleva a cabo por mera curiosidad, pues no ofrece ningún beneficio tangible inmediato— ha demostrado, casi a su pesar, que sí que proporciona

enormes beneficios tangibles. Allá por 1831, un político inquisitivo le preguntó a Michael Faraday, uno de los padres de la idea moderna del electromagnetismo, sobre la utilidad de esa cosa nueva de la «electricidad». Su respuesta apócrifa fue: «La desconozco, pero estoy convencido de que algún día su gobierno nos hará pagar impuestos por ella». (Las pruebas de que esta conversación se produjese son escasas, pero la historia es tan buena que la gente sigue contándola.) Un siglo más tarde, varias de las mentes más preclaras de la ciencia se las veían con el nuevo campo de la mecánica cuántica, arrastrados por varios resultados experimentales desconcertantes que terminarían por sacudir los cimientos de toda la física. Por aquel entonces era algo bastante abstracto, pero con el tiempo dio lugar a los transistores, los láseres, la superconductividad, los diodos emisores de luz (LED, Light-Emitting Diodes) y todo lo que sabemos sobre la energía nuclear (y las armas nucleares). De no ser por la investigación básica, el mundo actual sería un lugar completamente distinto.

Incluso la relatividad general, la deslumbrante teoría del espacio y el tiempo de Einstein, tiene aplicaciones prácticas. Si alguna vez ha utilizado un aparato GPS (Global Positioning System: Sistema de Posicionamiento Global) para ver cómo llegar a algún lugar, ha hecho uso de la relatividad general. Una unidad GPS, como la que incorpora su teléfono móvil o el sistema de navegación de su coche, recibe señales de un conjunto de satélites en órbita y a partir de una medición precisa del tiempo de esas señales calcula por triangulación la ruta hasta un punto sobre la superficie terrestre. Pero, según Einstein, los relojes que están en órbita (y, por tanto, sometidos a un campo gravitatorio más débil) marcan el tiempo un poquito más rápido que los que se encuentran al nivel del mar. Un efecto pequeño, desde luego, pero que se va acumulando. Si no tuviésemos en cuenta la relatividad, las señales GPS irían perdiendo precisión (y utilidad) progresivamente y, al cabo de un solo día, el error en la localización sería de varios kilómetros.

Pero las aplicaciones tecnológicas, aunque importantes, no son en última instancia lo fundamental para JoAnne Hewett, para mí, o para cualquiera de los

físicos experimentales que dedican tantas horas a construir equipos y a revisar datos. Cuando se producen, son estupendas, y todos estaremos encantados si alguien utiliza el bosón de Higgs para encontrar un remedio para el envejecimiento. Pero esa no es la razón por la que lo buscamos. Tratamos de encontrarlo porque somos curiosos. El Higgs es la última pieza de un rompecabezas que llevamos muchísimo tiempo intentando resolver. Encontrarlo es en sí mismo nuestra recompensa.

EL GRAN COLISIONADOR DE HADRONES

No habríamos encontrado el Higgs sin el Gran Colisionador de Hadrones (otro de esos nombres tan poco afortunados para algo que encarna la pasión humana por los descubrimientos). El LHC es la máquina más grande y compleja jamás construida por los seres humanos, al exorbitante precio de nueve mil millones de dólares. Los científicos que trabajan en el CERN esperan que sea productivo durante al menos cincuenta años. Pero no son tan pacientes: preferirían realizar descubrimientos capaces de cambiar el mundo cuanto antes, y se lo agradecemos.

Se mida como se mida, el LHC es colosal. Se concibió en los años ochenta y el permiso para su construcción se obtuvo en 1994. Mucho antes de que se pudiese en marcha, el LHC ya había saltado a los titulares, pues hubo varios intentos de detener su construcción en los tribunales, alegando que podría crear agujeros negros capaces de tragarse el mundo entero. Ninguno de ellos tuvo éxito, y el colisionador gigante entró plenamente en funcionamiento en 2009.

El 13 de diciembre de 2011, físicos de todo el mundo —y unos cuantos mirones interesados— se congregaron en salas de conferencias y frente a sus ordenadores para escuchar dos presentaciones de los investigadores del LHC. El asunto que se trataría era la búsqueda del bosón de Higgs, un tema muy frecuente en los seminarios de física, en los que el mensaje casi siempre es: «La

búsqueda va bien. ¡Deseadnos suerte!». Esta vez era diferente. Desde varios días antes, en internet circulaban rumores de que no nos darían el mensaje habitual, sino que esta vez nos dirían: «Pues sí, es posible que estemos viendo algo. Puede que por fin hayamos obtenido evidencia de que el bosón de Higgs está realmente ahí».

La respuesta es que sí, que había indicios de que el LHC estaba realmente viendo el Higgs. Pero solo eran indicios, nada definitivo. El LHC hace chocar entre sí protones a energías increíbles, y dos enormes detectores experimentales observan las partículas que surgen de esas colisiones. El número de veces que dos fotones (partículas de luz) de alta energía que se producían a una determinada energía era ligeramente mayor de lo que cabría esperar si no existiese el bosón de Higgs. Lo cual era una prueba de que probablemente algo pasaba, sin duda, aunque aún no podía considerarse un descubrimiento. Pero todo pintaba bien. Rolf Heuer concluyó la rueda de prensa con un guiño: «Nos vemos el año que viene con un descubrimiento».

Y eso hicieron. El 4 de julio de 2012, dos nuevos seminarios nos pusieron al día sobre la búsqueda del Higgs. Esta vez no se trataba de indicios sugerentes; habían encontrado la partícula, no cabía duda. Miles de físicos de todo el mundo aplaudieron con una mezcla de satisfacción y de alivio: el LHC era un éxito.

ENCrucIJADA

La física de partículas se encuentra en un momento crucial. Forma parte fundamental de la prolongada búsqueda de la humanidad para entender cómo funciona el universo, pero también es muy cara. Y su futuro es incierto.

La búsqueda del bosón de Higgs no es solo una historia de partículas subatómicas e ideas esotéricas, sino también de dinero, política y envidias. Un proyecto en el que participan tantas personas, una cooperación internacional sin precedentes, y un buen número de importantes avances tecnológicos no se llevan

a buen puerto sin ciertas dosis de confabulaciones y trapicheos, y algún que otro engaño.

El LHC no es el primer acelerador de partículas gigante que ha tratado de encontrar el Higgs. Antes estuvo el Tevatrón, en el Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab), a las afueras de Chicago, que entró en funcionamiento en 1983 y se apagó definitivamente en septiembre de 2011, después de una productiva vida que incluyó el descubrimiento del quark top, pero no el Higgs. Después vino el Gran Colisionador de Electrones y Protones (LEP, Large Electron-Positron Collider), activo entre 1989 y 2000 en el mismo túnel subterráneo que alberga ahora al LHC. En lugar de hacer chocar protones, relativamente masivos y que tienden a producir caóticas salpicaduras de partículas al encontrarse, en el LEP las colisiones eran entre electrones y positrones, su partícula gemela de antimateria. Esa configuración hizo posible realizar mediciones muy precisas, pero en ninguna de ellas se reveló el Higgs.

Y, finalmente, el Supercolisionador Superconductor (SSC, Superconducting Super Collider), al que Hewett se refería con melancolía. El SSC era la versión estadounidense del LHC, solo que más grande y mejor, y se esperaba que estuviese listo antes. Se propuso en la década de 1980 y estaba previsto que funcionase a energías casi tres veces mayores que las que algún día alcanzará el LHC (cinco veces mayores que las que consigue actualmente). Pero el LHC puede alardear de una enorme ventaja respecto al SSC: se construyó.

Tras apenas dos años en funcionamiento, el LHC nos ha obsequiado con un verdadero descubrimiento: una partícula que se parece mucho al bosón de Higgs. Supone el final de una era, pero también el comienzo de otra. El Higgs no es simplemente una partícula más. Es una partícula especial, que podría interactuar de manera muy natural con otras clases de partículas que aún no hemos detectado. Sabemos que el Modelo Estándar no es la respuesta definitiva: la materia oscura que han cartografiado los astrónomos es una prueba evidente de ello. El Higgs podría ser el portal que conecte nuestro mundo con otro que se encuentra apenas fuera de nuestro alcance. Una vez encontrada la nueva

partícula, tenemos por delante décadas de trabajo para llegar a conocer sus propiedades y para saber hasta dónde nos puede llevar.

El futuro a largo plazo de la física de partículas está aún por definir. Hace un siglo, o incluso cincuenta años, era posible realizar un descubrimiento fundamental utilizando un equipo que podía montar un solo científico con la ayuda de su equipo de estudiantes. Puede que esa época haya terminado. Si el LHC solo nos proporciona el Higgs, será cada vez más complicado convencer a los gobiernos reticentes para que dediquen aún más dinero a la construcción del siguiente colisionador.

Una máquina como el LHC representa una inversión de miles de millones de dólares, pero también de miles de personas-años de esfuerzo por parte de científicos entregados que dedican sus vidas a profundizar un poquito más en los misterios de la naturaleza. Personas como Lyn Evans, que ayudó a construir el LHC, o JoAnne Hewett, que estudió innumerables modelos teóricos, o Fabiola Gianotti y Joe Incandela, que lideraron sus respectivos experimentos hasta alcanzar un logro histórico, han hecho una apuesta enorme. Han apostado por que esta máquina nos conducirá a una nueva era de descubrimientos, y lo que han puesto en juego son muchos años de sus vidas profesionales. El descubrimiento del Higgs supone una reivindicación de todo el trabajo realizado. Pero, como dice Hewett, lo que queremos de verdad es que algo nos sorprenda, descubrir algo que nadie hubiese previsto. Eso es lo que realmente nos pondría las pilas.

Históricamente, a la naturaleza se le ha dado muy bien eso de sorprendernos.

A vueltas con lo divino

Donde aprendemos que el bosón de Higgs en realidad no tiene nada que ver con Dios, pero no por ello deja de ser muy importante.

Leon Lederman se arrepiente. Sabe lo que ha hecho, pero ya no puede desdecirse. Se trata de uno de esos pequeños detalles que acaba teniendo consecuencias enormes e imprevistas.

Nos referimos, por supuesto, a la «partícula divina». No a la partícula en sí, que es el bosón de Higgs, sino al nombre «partícula divina», del que Lederman es responsable.

Lederman es uno de los más grandes físicos experimentales del mundo, y obtuvo el premio Nobel en Física en 1988 por descubrir que existe más de un tipo de neutrino. Si no lo hubiese recibido por eso, otros muchos de sus logros lo habrían merecido también, incluido el descubrimiento de un nuevo tipo de quark. Solo se conocen tres neutrinos y seis quarks, lo cual da una idea de que descubrimientos como estos no se producen precisamente todos los días. En su tiempo libre ha ocupado el puesto de director del Fermilab y ha fundado la Academia de Matemáticas y Ciencia de Illinois. Lederman es también un personaje carismático, famoso entre sus colegas por su sentido del humor y su talento como narrador. Una de sus anécdotas preferidas refiere la historia de cómo, mientras estudiaba el doctorado, se las apañó para toparse con Albert Einstein mientras paseaba por los jardines del Instituto de Estudios Avanzados, en Princeton. El gran hombre escuchó pacientemente cómo el ávido jovencuelo le explicaba la investigación en física de partículas que estaba desarrollando en

Columbia, y a continuación le dijo con una sonrisa: «Eso no es interesante».

Pero, para el gran público, Lederman es más conocido por algo mucho menos afortunado: ofrecer al mundo la expresión «partícula divina» para referirse al bosón de Higgs. De hecho, ese es el título del entretenido libro sobre física de partículas y la búsqueda del Higgs que escribió con Dick Teresi. Como los autores explican en el primer capítulo del libro, eligieron esa expresión en parte porque «el editor no nos dejó llamarlo “La partícula maldita”, aunque ese habría sido un título más apropiado, teniendo en cuenta su perversa naturaleza y todo el dinero que se está gastando en buscarla».

Los físicos de todo el mundo, un grupo cuya tendencia a la división es bien conocida, estarán felizmente de acuerdo en una cosa: Odian la expresión «partícula divina». Peter Higgs, en quien se inspira la denominación más tradicional, dice entre risas: «La verdad es que ese libro me molestó bastante. Y creo que no fue solo a mí».

Entretanto, los periodistas de distintos lugares del mundo, a los que también les cuesta bastante ponerse de acuerdo, coinciden en una sola cosa: les encanta el nombre de «partícula divina». Si lee un artículo en la prensa generalista sobre el bosón de Higgs, puede apostar lo que quiera a que en algún momento su autor se referirá a él como la partícula divina.

Los periodistas tienen poca parte de culpa. Hay que reconocer que, como nombre, «partícula divina» tiene muchísimo más tirón que «bosón de Higgs», que suena bastante indescifrable. Pero tampoco se puede culpar a los físicos. El Higgs no tiene absolutamente nada que ver con Dios. Simplemente es una partícula muy importante, digna de la emoción que suscita, aunque dicha emoción no alcance las cotas del éxtasis religioso. Aun así, es comprensible por qué los físicos pueden sentir la tentación de otorgar un estatus de divinidad a esta humilde partícula elemental, incluso aunque carezca completamente de cualquier implicación teológica. (¿De verdad alguien puede pensar que Dios tiene alguna partícula elemental favorita?)

LA MENTE DE DIOS

La relación que los físicos mantienen con Dios es complicada y viene de largo. No solo con el hipotético ser omnipotente que creó el universo, sino con la propia palabra «Dios». Cuando hablan del universo, los físicos utilizan a menudo la idea de Dios para expresar algo sobre el mundo físico. Es famoso el caso de Einstein. Entre las citas más memorables de este eminente científico están: «Quiero conocer los pensamientos de Dios; el resto son detalles» y, por supuesto, «Estoy convencido de que Dios no juega a los dados con el universo».

Muchos de nosotros hemos caído en la tentación de seguir los pasos de Einstein. En 1992, un satélite de la NASA llamado COBE (Cosmic Background Explorer: Explorador del Fondo Cósmico) tomó una imágenes asombrosas de las diminutas perturbaciones que constituyen los vestigios del big bang en la radiación cósmica de fondo. La importancia del acontecimiento llevó a George Smoot, uno de los investigadores que trabajaban en el COBE, a decir: «Si uno es religioso, esto es como ver a Dios». Stephen Hawking, en el último párrafo de su best seller *Historia del tiempo*, tampoco evita utilizar un lenguaje teológico:

No obstante, si descubrimos una teoría completa, con el tiempo habrá de ser, en sus líneas maestras, comprensible para todos y no únicamente para unos pocos científicos. Entonces todos, filósofos, científicos y la gente corriente, seremos capaces de tomar parte en la discusión de por qué existe el universo y por qué existimos nosotros. Si encontrásemos una respuesta a esto, sería el triunfo definitivo de la razón humana, porque entonces conoceríamos el pensamiento de Dios.

Históricamente, algunos de los físicos más influyentes han sido muy religiosos. Isaac Newton, posiblemente el científico más grande de todos los tiempos, era un cristiano devoto aunque heterodoxo, que dedicaba tanto tiempo a estudiar e interpretar la Biblia como a la física. En el siglo xx tenemos el ejemplo de Georges Lemaître, un cosmólogo que desarrolló la teoría del «átomo primigenio» (que ahora se conoce como «modelo del big bang»). Lemaître era

sacerdote y profesor en la Universidad Católica de Lovaina, en Bélgica. En el modelo del big bang, el universo observable surgió en un momento singular de densidad infinita hace aproximadamente 13.700 millones de años; según la narración cristiana, Dios creó el universo en algún momento del tiempo. Existen evidentes semejanzas entre ambas historias, pero Lemaître siempre se cuidó mucho de no mezclar su religión con la ciencia. El papa Pío XII sugirió que el átomo primigenio podría identificarse con el «hágase la luz» del Génesis, pero el propio Lemaître lo convenció para que abandonase esa línea de razonamiento.

Sin embargo, hoy en día, la mayoría de los físicos son mucho menos proclives a creer en Dios que la ciudadanía en general. Cuando te ganas la vida estudiando el funcionamiento del mundo natural, es muy normal que te impresione lo bien que se las apaña el universo para funcionar por sí solo, sin ninguna intervención sobrenatural. Existen, qué duda cabe, llamativos ejemplos de científicos religiosos, pero es igualmente indudable que, en su trabajo, los físicos se las arreglan perfectamente sin necesidad de introducir en las ecuaciones nada ajeno al mundo natural.

HABLANDO DE DIOS

Si los físicos no creen tanto en Dios, ¿por qué siguen hablando de Él? Por dos razones, de hecho: una buena y otra no tanto.

La buena razón es simplemente que Dios es una metáfora muy conveniente para hablar del universo. Cuando Einstein dice: «Quiero conocer los pensamientos de Dios», no está pensando literalmente en el ser sobrenatural que el Papa se imagina. Expresa un deseo de conocer los mecanismos fundamentales de la realidad. El universo posee una característica asombrosa: tiene sentido. Si estudiamos lo que le sucede a la materia en diversas circunstancias, encontramos asombrosas regularidades que aparentemente no se violan jamás. Cuando concluimos que dichas regularidades son reales más allá de cualquier duda

razonable, las llamamos «leyes de la naturaleza».

Las leyes de la naturaleza son muy interesantes de por sí, pero también lo es el mero hecho de que existan tales leyes. Las que hemos descubierto hasta la fecha toman la forma de precisas y elegantes proposiciones matemáticas. Al físico Eugene Wigner le impresionaba tanto esta característica de la realidad que hablaba de la «irrazonable efectividad de las matemáticas en la física». Nuestro universo es algo más que una amalgama de materia que se comporta de manera aleatoria; es la evolución muy ordenada y predecible de determinados constituyentes de la materia, una intrincada coreografía de partículas y fuerzas.

Cuando los físicos se refieren metafóricamente a Dios, no hacen otra cosa que dejarse llevar por la natural tendencia humana a personificar el mundo natural, a darle un rostro humano. Queremos saber cuáles son esas leyes. Siendo aún más ambiciosos, nos gustaría saber si esas leyes podrían haber sido diferentes: ¿son las leyes de la naturaleza existentes solo unas de entre un conjunto de muchas posibles, o hay algo que hace que nuestro mundo sea único y especial? No sabemos si podremos o no dar respuesta a una pregunta tan imponente, pero cosas así son las que despiertan la imaginación de los científicos.

La otra razón por la que los científicos sucumben y acaban hablando de Dios es algo menos noble: las relaciones públicas. Llamar al bosón de Higgs «partícula divina» puede ser tremendamente inexacto, pero desde el punto de vista del marketing es una genialidad. Los físicos reaccionan ante la expresión «partícula divina» con horror y desprecio, pero a la gente le llama la atención, razón por la cual se seguirá empleando, aun cuando todos los periodistas que cubren el mundo de la ciencia sepan perfectamente lo que los científicos piensan de ella.

«Partícula divina» hace que la gente se detenga y preste atención. Una vez acuñada la expresión, no hay manera de que quien intente explicar este concepto esotérico a un público cuya atención se ve sometida a constantes exigencias deje de utilizarla. Si dices que estás buscando el bosón de Higgs, mucha gente cambiará de canal (puede que las hermanas Kardashian hayan hecho alguna de

las suyas), pero si dices que estás buscando la partícula divina, la gente al menos prestará atención mientras les explicas a qué te refieres. Ya te enterarás mañana de lo que han hecho las Kardashian.

De vez en cuando, el uso de un lenguaje llamativo como este hace que los científicos se metan en problemas. En 1993, cuando Estados Unidos aún pensaba en construir el Supercolisionador Superconductor, que habría sido más potente que el LHC, el premio Nobel Steven Weinberg compareció ante el Congreso para explicar las virtudes de esa nueva máquina. En un momento dado, las preguntas tomaron un cariz imprevisto:

CONGRESISTA HARRIS FAWELL (REPUBLICANO, POR ILLINOIS): A veces me gustaría que pudiésemos resumirlo todo en una sola palabra, aunque sé que eso es imposible. Quizá era eso a lo que usted, doctor Weinberg, se refería, no estoy seguro, pero esto es lo que anoté. Dijo usted que sospecha que el hecho de que existan leyes que gobiernan la materia no es en absoluto casual, y yo apunté lo siguiente: «¿Nos permitirá eso encontrar a Dios?». Estoy convencido de que no era eso lo que usted quería decir, pero sin duda nos permitiría comprender mucho mejor el universo, ¿no es así?

CONGRESISTA DON RITTER (REPUBLICANO, POR PENSILVANIA): ¿Me permitiría su señoría tomar la palabra? Si así fuese, me gustaría decir brevemente...

FAWELL: No estoy seguro de querer hacerlo.

RITTER: Si la máquina es capaz de eso que dice, estoy dispuesto a cambiar de opinión y apoyar su construcción.

Weinberg no cometió la torpeza de referirse al bosón de Higgs como la partícula divina durante su testimonio ante el Congreso, pero el atractivo de la metáfora es tal que, al hablar del funcionamiento de la realidad, uno acaba planteándose una pregunta como esa.

Para despejar cualquier ambigüedad que aún pudiese quedar: nada de lo que

podamos encontrar en el LHC, o de lo que hubiéramos podido descubrir en el Supercolisionador Superconductor, nos permitirá encontrar a Dios. Pero sí estaremos más cerca de comprender las leyes últimas de la naturaleza.

LA PIEZA FINAL

Lederman y Teresi no le pusieron al bosón de Higgs el sobrenombre de partícula divina únicamente porque sabían que llamaría la atención (aunque probablemente la idea se les pasó por la cabeza). Al fin y al cabo, esa vistosa denominación suscitó reacciones favorables y adversas a partes iguales. Así lo expresan en el prólogo de la edición revisada de su libro: «El título acabó ofendiendo a dos grupos: 1) aquellos que creen en Dios, y 2) los que no creen. Quienes se encuentran entre ambos extremos nos acogieron cordialmente».

Lo que pretendían era expresar la importancia del bosón de Higgs. El título del libro que el lector tiene entre manos es algo más modesto... pero solo ligeramente. Para ser sinceros, la reacción de los físicos cuando les hablo de *La partícula al final del universo* no es de aprobación unánime. Por lo que sabemos, el universo no tiene ningún «final», ya sea en algún lugar del espacio o en algún momento futuro en el tiempo. Y, si no existe un lugar donde pueda decirse que el universo acaba, no hay ninguna razón para pensar que uno podría encontrar una partícula allí. Y, si así fuese, no hay motivo para pensar que sería el bosón de Higgs.

Pero, una vez más, estamos hablando en sentido metafórico. El Higgs no se encuentra al «final del universo», ya sea espacial o temporal, sino al final de una explicación. Es la pieza final del rompecabezas que explica cómo funciona a un nivel profundo la materia ordinaria que forma nuestro mundo cotidiano. Algo de gran importancia.

Debería apresurarme a exponer las advertencias antes de que mis colegas físicos se enfaden otra vez. El Higgs no es la pieza que falta en el rompecabezas

que explica absolutamente todas las cosas. Aun después de encontrar el Higgs y medir sus propiedades, queda mucha física por entender. Para empezar, está la gravedad: toda una fuerza de la naturaleza que aún no somos capaces de reconciliar con las exigencias de la mecánica cuántica, y no esperamos que el Higgs nos ayude a hacerlo. También están la materia oscura y la energía oscura, misteriosas sustancias que permean todo el universo y que siguen resistiéndose a la detección directa aquí en la Tierra. Existen otras hipotéticas partículas exóticas, de esas que a los físicos teóricos les encanta inventarse pero de las que a día de hoy no tenemos prueba alguna. Y están, ni que decir tiene, todas las áreas de la ciencia que presentan sus propias dificultades, para cuya resolución la física de partículas no aporta nada fundamental, desde la física atómica y molecular a la química, la biología y la geología, hasta llegar a la sociología, la psicología o la economía. El deseo humano de entender el mundo no quedará plenamente satisfecho solo porque hayamos descubierto el bosón de Higgs.

Una vez expuestas todas estas cláusulas de exención de responsabilidad, hagamos hincapié de nuevo en el papel singular del Higgs: Es la parte final del Modelo Estándar de la física de partículas. El Modelo Estándar explica todo lo que experimentamos en nuestras vidas cotidianas (aparte de la gravedad, que es bastante fácil de incorporar). Quarks, neutrinos y fotones: calor, luz y radiactividad; mesas, ascensores y aviones; televisores, ordenadores y teléfonos móviles; bacterias, elefantes y personas; asteroides, planetas y estrellas. Todos ellos son simplemente aplicaciones del Modelo Estándar en distintas circunstancias. Es la teoría completa de la realidad más inmediata. Y todo encaja perfectamente, superando una extraordinaria variedad de pruebas experimentales, siempre que el bosón de Higgs exista. Sin el Higgs, o algo aún más extraño que ocupe su lugar, el Modelo Estándar se vendría abajo.

DESCUBRIENDO DÓNDE ESTÁ EL TRUCO

Hay algo sospechoso en todas estas afirmaciones sobre lo importante que es el Higgs. Al fin y al cabo, antes de que lo hubiésemos encontrado efectivamente, ¿cómo sabíamos lo importante que era? ¿Qué era lo que nos llevaba a seguir hablando de las propiedades de una partícula hipotética que nadie había observado?

Imagine que asiste al espectáculo de un muy buen mago, que realiza un truco de cartas asombroso, en el que un naipe levita misteriosamente en el aire. El truco le deja desconcertado, aunque está absolutamente convencido de que el mago no ha utilizado poderes místicos para hacer que la carta levite. Como usted es inteligente y tenaz, le sigue dando vueltas hasta que encuentra una manera en la que el mago lo podría haber hecho, atando un hilo delgado a la carta. De hecho, se le ocurren otras posibilidades, que incluyen chorros de aire y bombas de calor, pero la opción del hilo es a la vez sencilla y plausible. Llega incluso a reproducir el truco en casa, y se convence de que utilizando el hilo apropiado puede hacerlo tan bien como el mago.

Pero vuelve a ver la actuación del mago, y de nuevo ve cómo levita la carta. Su versión es muy parecida a la que ha hecho en casa aunque, por mucho que lo intente, no consigue ver el hilo.

El bosón de Higgs del Modelo Estándar es como ese hilo. Durante mucho tiempo fuimos incapaces de verlo directamente, aunque sí veíamos sus efectos. O, mejor aún, observábamos propiedades del mundo que se explican perfectamente si existe, pero carecen de sentido si no es así. Sin el bosón de Higgs, partículas como el electrón tendrían una masa nula y se moverían a la velocidad de la luz. Pero el caso es que tienen masa y se mueven más despacio. Sin el bosón de Higgs, muchas partículas elementales serían idénticas entre sí, pero lo que sucede de hecho es que son manifiestamente distintas, que poseen masas y tiempos de vida distintos. Con el Higgs, entendemos perfectamente todas estas características de la física de partículas.

En estas circunstancias, tanto en el caso de la carta que levita como en el del bosón de Higgs, caben dos opciones: O bien nuestra teoría es correcta o bien una

teoría aún más interesante y elaborada es la correcta. Los efectos son reales: la carta flota, las partículas tienen masa. Tiene que haber una explicación. Si es la más sencilla, nos congratularemos de nuestra agudeza; si es algo más complicado, habremos aprendido algo muy interesante. Puede que la partícula que el LHC ha encontrado haga una parte de lo que esperábamos que hiciese el Higgs, pero no todo; o puede que la labor del Higgs la lleven a cabo varias partículas, de las cuales solo hemos encontrado una. En cualquier caso, siempre que acabemos entendiendo qué es lo que sucede, salimos ganando.

FERMIONES Y BOSONES

Veamos si somos capaces de traducir toda esta exaltación metafórica sobre lo importante que es el bosón de Higgs en una explicación más concreta de lo que se supone que la partícula en realidad hace.

Hay dos tipos de partículas: las que componen la materia, conocidas como «fermiones», y las que transportan las fuerzas, llamadas «bosones». La diferencia entre ambas es que los fermiones ocupan espacio, mientras que los bosones se pueden acumular unos sobre otros. No se pueden colocar un montón de fermiones idénticos en el mismo lugar; las leyes de la mecánica cuántica no lo permitirían. Esa es la razón por la que los objetos sólidos, como las mesas y los planetas, están formados por conjuntos de fermiones: estos no se pueden aplastar unos encima de otros.

En concreto, cuanto menor es la masa de la partícula, mayor es el espacio que ocupa. Los átomos están formados a partir de solo tres tipos de fermiones — quarks up, quarks down y electrones— que se mantienen unidos por las fuerzas. El núcleo, compuesto por protones y neutrones, que a su vez están formados por quarks up y down, es relativamente pesado, y ocupa un volumen de espacio relativamente pequeño. Los electrones, por su parte, son mucho más ligeros (su masa es alrededor de 2.000 veces menor que la del protón o el neutrón) y ocupan

mucho más espacio. En realidad, son los electrones de los átomos los que hacen que la materia sea sólida.

Los bosones no ocupan ningún espacio. Dos bosones, o dos billones de bosones, pueden encontrarse exactamente en la misma posición, unos encima de otros. Ese es el motivo por el que los bosones son las partículas que transmiten las fuerzas: pueden combinarse para dar lugar a un campo macroscópico, como el campo gravitatorio que nos mantiene unidos a la Tierra, o el campo magnético que desvía la aguja de una brújula.

Los físicos suelen utilizar las palabras «fuerza», «interacción» y «acoplamiento» de manera prácticamente intercambiable, lo cual es consecuencia de una de las verdades profundas descubiertas por la física del siglo xx: las fuerzas se pueden entender como el resultado del intercambio de partículas. (Como veremos, esto es equivalente a decir: «como el resultado de las vibraciones de los campos».) Cuando la Luna siente la atracción gravitatoria de la Tierra, podemos imaginar que hay gravitones que pasan de uno a otro cuerpo. Cuando un electrón es atrapado por un núcleo atómico, es porque ambos han intercambiado fotones. Pero estas fuerzas son también responsables de otros procesos en los que intervienen las partículas, como su aniquilación o su desintegración, no solo la atracción y la repulsión. Cuando se desintegra un núcleo radiactivo, podemos achacar ese evento a la acción de las fuerzas nucleares, fuerte o débil, dependiendo de cuál sea el tipo de desintegración que se produzca. En física de partículas, las fuerzas son responsables de una amplia variedad de situaciones.

Aparte del Higgs, conocemos cuatro tipos de fuerzas, cada una de las cuales lleva asociadas sus propias partículas bosónicas. Tenemos la gravedad, asociada con una partícula denominada «gravitón». Es verdad que aún no hemos observado ningún gravitón por separado, por lo que no se le suele incluir al hablar del Modelo Estándar, aunque sí detectamos la fuerza de la gravedad cada día que no salimos flotando hacia el espacio. Pero, puesto que la gravedad es una

fuerza, las reglas fundamentales de la mecánica cuántica y de la relatividad prácticamente garantizan que existen partículas asociadas a ella, por lo que utilizamos el término «gravitón» para referirnos a esas partículas que aún no hemos visto individualmente. La forma en que la gravedad actúa como una fuerza sobre otras partículas es bastante sencilla: cada partícula atrae a todas las demás (aunque muy débilmente).

También está el electromagnetismo (en el siglo XIX, los físicos se dieron cuenta de que los fenómenos de la «electricidad» y el «magnetismo» eran dos versiones distintas de la misma fuerza básica). Las partículas asociadas con el electromagnetismo se denominan «fotones», y las vemos directamente todos los días. Las partículas que interactúan con el electromagnetismo están «cargadas», mientras que las que no lo hacen son «neutras». Las cargas eléctricas pueden ser positivas o negativas: las del mismo signo se repelen, mientras que las de signos opuestos se atraen. Esta capacidad que poseen las cargas de repelerse mutuamente es absolutamente fundamental para el funcionamiento del universo. Si el electromagnetismo fuese únicamente atractivo, todas las partículas se atraerían entre sí y lo único que haría la materia del universo sería fundirse en un agujero negro gigante. Por suerte, tenemos tanto repulsión como atracción electromagnéticas, lo que hace que la vida sea interesante.

FUERZAS NUCLEARES

Tenemos también las dos fuerzas «nucleares», así llamadas porque (a diferencia de la gravedad y el electromagnetismo) su alcance se limita a distancias muy reducidas, comparables al tamaño del núcleo atómico o menores. Está la fuerza nuclear fuerte, que mantiene unidos los quarks en el interior de los protones y los neutrones, y cuyas partículas reciben el entrañable nombre de «gluones». La fuerza nuclear fuerte es (como era de suponer) muy intensa, e interactúa con

los quarks pero no con los electrones. Los gluones no tienen masa, como los fotones y los gravitones. Cuando las partículas que transmiten una fuerza carecen de masa, cabe esperar que su influencia sea de largo alcance, pero de hecho el de la fuerza nuclear fuerte es muy reducido.

En 1973, David Gross, David Politzer y Frank Wilczek demostraron que esta fuerza posee una sorprendente propiedad: la intensidad de la atracción entre dos quarks aumenta cuando crece la distancia entre ellos. Por tanto, para separar dos quarks hace falta cada vez más energía, tanta que llega un momento en que se crean más quarks. Es como estirar una goma, cada uno de cuyos extremos representa un quark. Podemos tirar de ambos extremos, pero nunca conseguiremos quedarnos solo con uno de ellos, sino que, si la tira se rompe, se crearán dos nuevos extremos. Análogamente, nunca podremos ver un solo quark libre; siempre están confinados (junto con los gluones) dentro de partículas más pesadas. Estas partículas compuestas, formadas por quarks y gluones, se denominan «hadrones» (de ahí procede la hache en las siglas LHC). Gross, Politzer y Wilczek compartieron el premio Nobel de 2004 por este descubrimiento.

La fuerza nuclear débil hace honor a su nombre. Aunque no tiene un papel muy relevante en nuestro entorno inmediato en la Tierra, sí es importante para la existencia de la vida: contribuye a que el Sol brille. La energía solar proviene de la conversión de protones en helio, lo que requiere que parte de esos protones se conviertan en neutrones, cosa que sucede mediante la interacción débil. Pero aquí en la Tierra, salvo que te dediques a la física de partículas o a la física nuclear, es poco probable que veas la fuerza débil en acción.

Los bosones que transportan la fuerza débil son de tres tipos. Está el bosón Z, que es eléctricamente neutro, y dos bosones W distintos, uno con carga eléctrica positiva y otro con carga negativa, denominados W^+ y W^- , para abreviar. Los bosones W y Z son bastante pesados para lo que es habitual entre las partículas elementales (pesan aproximadamente como un átomo de zirconio, si es que eso le ayuda al lector a hacerse una idea), lo que significa que es difícil producirlos y

que se desintegran bastante rápido y ayuda a explicar por qué las interacciones débiles son tan tenues.

En el lenguaje cotidiano, utilizamos la palabra «fuerza» para referirnos a cosas de lo más variado: la fuerza de rozamiento cuando algo se desliza, la fuerza de impacto cuando chocamos contra un muro, la fuerza de la resistencia del aire cuando una pluma cae hacia el suelo. Se habrá dado cuenta de que ninguna de esas aparece en nuestra lista de cuatro fuerzas de la naturaleza, y de que tampoco tienen bosones asociados a ellas. Esa es la diferencia entre la física de las partículas elementales y el uso coloquial. Todas las «fuerzas» macroscópicas que experimentamos en nuestra vida cotidiana, desde la aceleración cuando pisamos el pedal del coche al tirón en la correa cuando el perro de pronto ve una ardilla y sale disparado a por ella, surgen en última instancia como complicados efectos colaterales de las fuerzas fundamentales. De hecho, con la notable excepción de la gravedad (que es bastante sencilla, ya que empuja todas las cosas hacia abajo), todos estos fenómenos cotidianos no son más que manifestaciones del electromagnetismo y de sus interacciones con los átomos. Este es el logro de la ciencia moderna: reducir la maravillosa variedad del mundo que nos rodea a unos pocos ingredientes básicos.

LOS CAMPOS SE EXTIENDEN POR TODO EL UNIVERSO

De esas cuatro fuerzas, una ha destacado desde siempre como algo raro: la fuerza débil. La gravedad tiene sus gravitones, el electromagnetismo sus fotones y la fuerza fuerte sus gluones; un tipo de bosones por cada fuerza. La fuerza débil viene con tres bosones diferentes: el Z, neutro, y los dos W, con carga. Y además, esos bosones son responsables de comportamientos extraños. Emitiendo un bosón W, un fermión de un tipo puede transformarse en uno de otra clase: un quark down puede escupir un W^- y transformarse en un quark up. Los neutrones, que están compuestos de dos downs y un up, se desintegran cuando

están solos fuera del núcleo (uno de sus quarks down emite un W^- y el neutrón se convierte en un protón, que consta de dos ups y un down). Ninguna de las otras fuerzas altera la identidad de las partículas con las que interactúa.

Las interacciones débiles, en resumen, son un lío. Y el motivo es sencillo: el Higgs.

El Higgs es fundamentalmente diferente de todos los demás bosones. Los otros, como veremos en el capítulo 8, surgen porque existe en la naturaleza algún tipo de simetría que conecta lo que sucede en distintos puntos del espacio. Una vez que creemos en esas simetrías, los bosones son prácticamente inevitables. Pero el Higgs no es así en absoluto. No hay ningún principio profundo que exija su existencia, pero existe de todos modos.

Después de que el LHC anunciase el descubrimiento del Higgs el 4 de julio, hubo centenares de propuestas para explicar cuál era su significado. El motivo principal por el que esta tarea supone un reto tan grande es que, en realidad, lo más interesante no es el propio bosón de Higgs, sino el campo de Higgs del que surge. Es un hecho de la física que todas las distintas partículas en realidad surgen de sendos campos. Es la teoría cuántica de campos, el marco básico de todo lo que hacen los físicos de partículas. Sin embargo, la teoría cuántica de campos no es algo que se enseñe a los chavales en el instituto. Ni siquiera se suele explicar en los libros de divulgación de física, donde sí se habla de partículas, de mecánica cuántica y de relatividad, aunque rara vez nos adentramos en las maravillas de la teoría cuántica de campos que subyace en todo lo demás. Pero, cuando se trata del bosón del Higgs, ya no podemos ocultar por más tiempo que en última instancia todo son campos.

Cuando hablamos de un «campo» estamos hablando de «algo que toma un valor en cada punto del espacio». La temperatura de la atmósfera terrestre es un campo; en cada punto de la superficie terrestre (o a cualquier altura por encima de ella) el aire tiene una determinada temperatura. La densidad y la humedad de la atmósfera también son campos. Aunque no son campos fundamentales, sino simplemente características del propio aire. En cambio, el campo

electromagnético, o el gravitatorio, se consideran fundamentales. No están compuestos de ninguna otra cosa, sino que son aquello de lo que el mundo está hecho. Según la teoría cuántica de campos, absolutamente todas las cosas están formadas por un campo o por una combinación de campos. Lo que llamamos «partículas» son minúsculas vibraciones de esos campos.

Aquí es donde entra en juego la parte «cuántica» de la teoría cuántica de campos. Podríamos hablar largo y tendido sobre la mecánica cuántica, quizá la idea más misteriosa que el ser humano se haya planteado jamás, pero lo único que necesitamos saber ahora es un hecho sencillo (aunque difícil de aceptar): el mundo tal y como se nos muestra cuando lo observamos es muy distinto de como es en realidad.

El físico John Wheeler propuso una vez un desafío: ¿cuál es la mejor explicación de la mecánica cuántica en un máximo de cinco palabras? En el mundo actual, es fácil recoger sugerencias para cualquier pregunta que permita una respuesta corta: basta con plantearla en Twitter, el servicio de *microblogging* que limita las entradas a 140 caracteres. Cuando hice lo propio con la cuestión sobre la mecánica cuántica, la mejor respuesta fue la de Aatish Bhatia (@aatishb): «No miramos: ondas. Miramos: partículas». Eso es la mecánica cuántica en una sola línea.

Cada una de las partículas que contempla el Modelo Estándar es, en el fondo, una vibración de un campo determinado. Los fotones que transmiten el electromagnetismo son vibraciones del campo electromagnético que se extiende por el espacio. Los gravitones son vibraciones del campo gravitatorio, los gluones son vibraciones del campo gluónico, etcétera. Incluso los fermiones — las partículas de materia— son vibraciones de un campo subyacente. Existe un campo de electrones, un campo de quarks up, y en general un campo para cada tipo de partícula. De la misma manera en que las ondas de sonido se propagan a través del aire, las vibraciones se propagan por los campos cuánticos, y las observamos como partículas.

Hace un momento he dicho que las partículas con una masa pequeña ocupan

más espacio que las que tienen una masa mayor. El motivo es que las partículas en realidad no son bolas de densidad uniforme, sino ondas cuánticas. Cada una tiene una longitud de onda, que nos da una idea aproximada de su tamaño, y que determina también su energía: hace falta más energía para tener una longitud de onda más corta, ya que la onda necesita entonces variar más rápidamente de un punto a otro. Y la masa, como Einstein nos explicó hace tiempo, no es más que una forma de energía. Así que una menor masa implica menos energía, que a su vez significa una mayor longitud de onda, lo que resulta en un tamaño mayor; y, en sentido contrario, una masa mayor significa más energía, que implica una menor longitud de onda, lo que da lugar a un tamaño menor. Todo esto tiene sentido una vez que lo analizamos por partes.

LEJOS DEL CERO

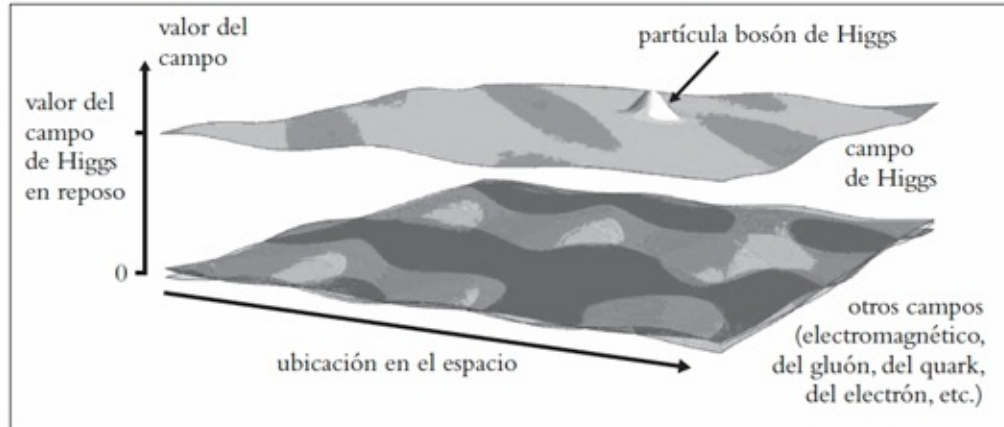
Los campos toman un valor en cada punto del espacio, y allí donde el espacio está completamente vacío ese valor es normalmente cero. Por «vacío» entendemos «tan vacío como puede estarlo», o, más concretamente, «con la menor energía posible». Según esta definición, campos como el gravitatorio o el electromagnético se mantienen en el cero allí donde el espacio está verdaderamente vacío. Cuando toman algún otro valor, transportan energía, y por lo tanto el espacio no está vacío. Todos los campos experimentan minúsculas vibraciones debidas a la indeterminación intrínseca a la mecánica cuántica, pero dichas vibraciones se producen alrededor de un valor medio, que suele ser cero.

El Higgs es diferente. Es un campo, igual que los demás, y puede tomar un valor nulo o distinto de cero. Pero no quiere ser cero: quiere tener un valor constante y no nulo en todo el universo. El campo de Higgs tiene menos energía cuando es distinto de cero que cuando lo es.

Por tanto, el espacio vacío está repleto de campo de Higgs: no de un conjunto complicado de vibraciones que representarían una serie de bosones de Higgs

individuales, sino simplemente de un campo constante, que permanece tranquilamente en segundo plano. Es ese campo, siempre presente en cualquier punto del universo, el que hace que las interacciones débiles sean como son y que los fermiones elementales tengan la masa que tienen. El bosón de Higgs —la partícula descubierta en el LHC— es una vibración de ese campo alrededor de su valor medio.

Como la partícula de Higgs es un bosón, da lugar a una fuerza de la naturaleza. Dos partículas con masa pueden cruzarse e interactuar mediante el intercambio de bosones de Higgs, igual que dos partículas cargadas pueden interactuar intercambiando fotones. Pero la fuerza de Higgs no es la que hace que las partículas tengan masa, y en general no es la causa última de todo el revuelo a su alrededor. El que hace que las partículas tengan masa es el campo de Higgs, que existe como medio a través del cual otras partículas se desplazan, y que afecta a sus propiedades cuando lo hacen.



Una diferencia importante entre el campo de Higgs y el resto de campos es que su valor en reposo es distinto de cero. Todos los campos experimentan minúsculas vibraciones como consecuencia de la indeterminación intrínseca a la mecánica cuántica. Una vibración más grande se nos muestra como una partícula; en este caso, el bosón de Higgs.

Cuando nos movemos por el espacio, estamos rodeados por el campo de Higgs y nos desplazamos dentro de él. Como el proverbial pez en el agua,

normalmente no lo notamos, pero es ese campo el que hace que el Modelo Estándar sea tan extraño.

RESUMEN EJECUTIVO

La idea del bosón de Higgs lleva asociada mucha física profunda y complicada, pero, de momento, nos limitaremos a hacer un repaso general de cómo funciona el campo de Higgs y por qué es importante. Sin más dilación:

- El mundo está compuesto por campos, sustancias que se extienden por todo el espacio y que notamos a través de sus vibraciones, que se nos muestran como partículas. El campo eléctrico y el campo gravitatorio pueden resultarnos familiares, pero, según la teoría cuántica de campos, incluso las partículas como los electrones o los quarks son en realidad vibraciones de ciertos tipos de campos.
- El bosón de Higgs es una vibración del campo de Higgs, de la misma manera en que un fotón de luz es una vibración del campo electromagnético.
- Las famosas cuatro fuerzas de la naturaleza surgen de sendas simetrías, cambios que podemos introducir en una situación sin alterar ningún detalle importante de lo que sucede. (A primera vista es cierto que no tiene mucho sentido que «un cambio que no implica ninguna diferencia» conduzca directamente a «una fuerza de la naturaleza»... pero esa es una de las desconcertantes ideas de la física del siglo XX.)
- Las simetrías a veces están ocultas, y son por tanto invisibles para nosotros. Los físicos suelen decir que las simetrías ocultas están «rotas», pero siguen estando ahí, en las leyes básicas de la física. Lo único que sucede es que se esconden en el mundo directamente observable.
- La fuerza nuclear débil, en particular, se basa en una determinada clase de simetría. Si dicha simetría no estuviese rota, sería imposible que las partículas elementales tuviesen masa. Todas se moverían de un lado a otro a la velocidad de la luz.
- Pero la mayoría de las partículas elementales tienen masa, y no se mueven a la velocidad de la luz. Por lo tanto, la simetría de las interacciones débiles ha de estar rota.
- Cuando el espacio está completamente vacío, la mayoría de los campos están desconectados. Si un campo no es nulo en el espacio vacío, puede romper una simetría. En el caso de las interacciones débiles, eso es lo que hace el campo de Higgs. Sin él, el universo sería un lugar completamente distinto.

¿Lo ha entendido todo? Reconozco que son muchas las cosas que hay que asimilar. Todo tendrá más sentido cuando completemos nuestro recorrido por los

demás capítulos. Confíe en mí.

El resto del libro será un viaje de ida y vuelta a través de las ideas que subyacen en el mecanismo de Higgs y la búsqueda experimental para descubrir el bosón. Comenzaremos con un rápido repaso de cómo encajan entre sí las partículas y las fuerzas del Modelo Estándar, y a continuación exploraremos las asombrosas maneras en que los físicos utilizan la tecnología y su intuición para descubrir nuevas partículas. Después volveremos a la teoría para reflexionar sobre los campos y las simetrías y sobre cómo el Higgs puede hacer que ciertas simetrías permanezcan ocultas a nuestros ojos. Finalmente, podremos explicar cómo se descubrió el Higgs, cómo se difundió la noticia, quién se llevará el reconocimiento y qué significa todo eso de cara al futuro.

Llegados a este punto, debería estar claro por qué Leon Lederman pensó que «partícula divina» era un nombre apropiado para el bosón de Higgs. Este bosón es la pieza oculta que explica el truco de magia con que el universo nos obsequia al darles a las partículas masas distintas, haciendo así que la física de partículas sea interesante. Sin el Higgs, la intrincada diversidad del Modelo Estándar se reduciría a una anodina colección de partículas casi idénticas, y todos los fermiones tendrían una masa prácticamente nula. No habría átomos, ni química, ni vida tal y como la conocemos. El bosón de Higgs es en cierto sentido lo que le da vida al universo. Si hay una partícula que merezca un nombre tan pomposo, no cabe duda de que esa es el bosón de Higgs.

Átomos y partículas

Donde descomponemos la materia para revelar cuáles son sus constituyentes últimos: los quarks y los leptones.

A principios del siglo XIX, el médico alemán Samuel Hahnemann fundó la práctica de la homeopatía. Frustrado por la ineficacia de la medicina de su época, Hahnemann desarrolló un nuevo enfoque basado en el principio de «lo similar cura lo similar»: una enfermedad puede tratarse precisamente con la misma sustancia que la provoca, siempre que esta se manipule adecuadamente. La manera de hacerlo se conoce como «potenciación», y consiste en diluir la sustancia en agua repetidamente, agitándola enérgicamente cada vez. Un método de dilución típico podría ser mezclar una parte de sustancia con noventa y nueve de agua. El remedio homeopático se prepara diluyendo, agitando, diluyendo de nuevo y volviendo a agitar, y así incluso hasta doscientas veces.

Más recientemente, Crispian Jago, que trabaja como consultor de software y promueve el escepticismo frente a las supercherías en su tiempo libre, quiso demostrar que no cree que la homeopatía sea un enfoque válido para la medicina. Para ello, decidió aplicar el método de las diluciones en serie a una sustancia fácil de conseguir: su propia orina. Que a continuación procedió a beberse. La impaciencia le llevó a diluirla solo treinta veces. Y no la llamó «orina», sino «pis», lo que le permitió afirmar que estaba desarrollando una cura para estar *pissed* (que en inglés se puede interpretar como «enfadado», en Estados Unidos, o «borracho», en Reino Unido). Los resultados, como era de

esperar, se hicieron públicos en forma de un provocativo vídeo en YouTube.

Jago tenía buenos motivos para que no le inquietase la idea de beber orina diluida treinta veces en una concentración de 1:99: cuando se obtuvo el vaso final, ya no quedaba nada de la sustancia original. Si las diluciones se habían realizado con el suficiente cuidado, no es que quedase «una cantidad minúscula», sino que no había nada de nada.

Esto se debe a que todas las cosas en nuestro mundo cotidiano —la orina, los diamantes, las patatas fritas, lo que sea— están compuestas por átomos, unidos normalmente en moléculas. Esas moléculas son la menor unidad de sustancia que puede considerarse como tal. Por separado, dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno no son más que átomos; juntos, se convierten en agua.

Puesto que el mundo está compuesto de átomos y moléculas, no se pueden diluir las cosas indefinidamente y pretender que conserven su identidad. Una cucharadita de orina contiene aproximadamente 1024 moléculas. Si se diluye una vez, mezclando una parte de orina con 99 partes de agua, quedarán 1022 moléculas. Si se vuelve a diluir, habrá 1020 moléculas. Si se diluye doce veces, en promedio quedará una sola molécula de la sustancia original. A partir de ahí, todo es pura pantomima: lo único que hacemos es mezclar agua con agua. Con unas cuarenta diluciones podríamos hacer desaparecer cualquier molécula en el universo conocido.

Así pues, cuando el proceso finalizó y Jago dio el trago triunfal, el agua que estaba bebiendo era tan pura como la que sale normalmente del grifo. Por supuesto, quienes defienden la homeopatía saben que esto es así. Creen que las moléculas de agua tienen «memoria» de la hierba o compuesto químico que se utilizó en la dilución original y que, de hecho, la solución final es más potente que la sustancia inicial. Esto va en contra de todos nuestros conocimientos de física y química, y los ensayos clínicos sitúan los remedios homeopáticos al nivel del placebo a la hora de combatir las enfermedades. Sin embargo, cada cual tiene derecho a tener su propia opinión.

Pero, como se suele decir, a lo que no tiene derecho es a sus propios hechos. Y

el hecho de que la materia está compuesta por átomos y moléculas es uno muy notorio. En realidad, los hechos fundamentales son dos: por una parte, la materia se puede descomponer en pequeños pedazos que representan la unidad más pequeña posible de ese tipo de sustancia; por otra, solo se necesitan unos pocos elementos fundamentales, combinados de varias maneras, para dar cuenta de toda la diversidad que existe en el mundo que podemos observar.

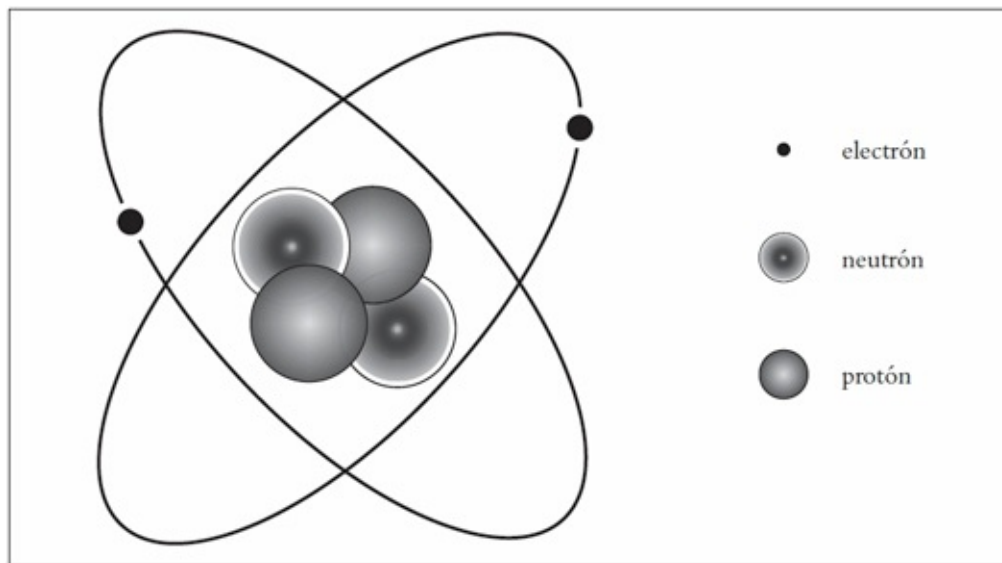
A primera vista, el zoo de partículas puede resultar complejo e imponente, pero solo hay doce partículas de materia, que se dividen nítidamente en dos grupos de seis: los quarks, que son sensibles a la fuerza nuclear fuerte, y los leptones, que no lo son. Es una historia asombrosa, que se ha ido desarrollando a lo largo de un siglo, desde el descubrimiento del electrón en 1897 hasta la detección del último fermión elemental (el neutrino tauónico) en 2000. Aquí la repasaremos brevemente, y dejaremos los detalles cuantitativos para el apéndice 2. Cuando hayamos aclarado el panorama, tendremos una colección de partículas razonablemente manejable de las que se compone todo lo demás.

REPRESENTACIONES DE LOS ÁTOMOS

Todos hemos visto dibujos con representaciones de los átomos. Se suelen pintar como diminutos sistemas solares, con un núcleo central rodeado de electrones en órbita. Es una imagen emblemática, que sirve, por ejemplo, para el logo de la Comisión de la Energía Atómica estadounidense. Pero es ligeramente engañosa.

Este dibujo del átomo representa el modelo de Bohr, llamado así en honor del físico danés Niels Bohr, que aplicó los conocimientos de los primeros tiempos de la mecánica cuántica al modelo atómico desarrollado previamente por el físico británico de origen neozelandés Ernest Rutherford. En el átomo de Rutherford, los electrones orbitan el núcleo a una distancia cualquiera, igual que los planetas en el sistema solar (con la diferencia de que lo que los atrae hacia el centro es el electromagnetismo, no la gravedad). Bohr modificó esta idea al forzar a los

electrones a describir únicamente ciertas órbitas, lo que supuso un gran paso adelante a la hora de ajustarse a los datos de la radiación emitida por los átomos. Hoy en día sabemos que los electrones en realidad no «orbitan» en absoluto, porque en realidad no poseen una «posición» o una «velocidad» definidas. La mecánica cuántica dice que los electrones existen en nubes de probabilidad conocidas como «funciones de onda», que nos indican dónde podríamos encontrar la partícula si la buscásemos.



Representación de un átomo; de helio, en este caso. Un núcleo formado por dos protones y dos neutrones se encuentra en el centro, mientras dos electrones «orbitan» a su alrededor.

Teniendo en cuenta lo anterior, parece que la representación esquemática del átomo que tenemos mentalmente no está tan mal, si lo que queremos es hacernos una idea intuitiva de lo que sucede en su interior. El núcleo en el centro, y los electrones alrededor. Los electrones son relativamente ligeros: más del 99,9 por ciento de la masa del átomo se encuentra en su núcleo, que está compuesto por una combinación de protones y neutrones. El neutrón es un poco más pesado que el protón: el neutrón es unas 1.842 veces más pesado que el electrón, mientras

que el protón es 1.836 veces más pesado. A los protones y electrones se les conoce como «nucleones», ya que son las partículas que componen los núcleos. Salvo por el hecho de que el protón tiene carga eléctrica y porque el neutrón es algo más pesado, ambos nucleones poseen propiedades notablemente similares.

Como muchas otras cosas en la vida, la naturaleza del átomo está basada en un equilibrio preciso. Los electrones son atraídos por el núcleo debido a la fuerza electromagnética, que es extraordinariamente más intensa que la gravitatoria. La atracción electromagnética entre un electrón y un protón es unas 10^{39} veces más fuerte que la gravitatoria. Pero, mientras que la gravedad es sencilla —todas las cosas atraen a todas las demás—, el electromagnetismo es más sutil. Los neutrones deben su nombre al hecho de que son neutros, es decir, no poseen carga eléctrica. De modo que la fuerza electromagnética entre un electrón y un neutrón es nula.

Las partículas que poseen carga eléctrica del mismo tipo se repelen entre sí, mientras que las que tienen cargas de tipo opuesto, cumpliendo con el cliché romántico, se atraen. Los electrones se ven atraídos por los protones en el interior del núcleo, porque los primeros tienen carga negativa y los segundos carga positiva. Entonces, el lector se preguntará: ¿por qué no se repelen entre sí los protones, que están tan apretados dentro del núcleo? La respuesta es que la repulsión electromagnética que, en efecto, tiende a separarlos es contrarrestada con creces por la fuerza nuclear fuerte. Los electrones no son sensibles a esta fuerza (de la misma manera que los neutrones no lo son al electromagnetismo), pero los protones y los neutrones sí, razón por la cual pueden unirse para formar los núcleos atómicos. Aunque solo hasta cierto punto. Si el núcleo crece demasiado, llega un momento en que la repulsión eléctrica es tal que el núcleo se vuelve radiactivo; puede que sobreviva durante un tiempo, pero llegará un momento que se desintegre en núcleos más pequeños.

ANTIMATERIA

Todo lo que ve ahora mismo a su alrededor, todas las cosas que ha visto con sus propios ojos a lo largo de su vida, todo lo que ha oído con sus oídos y experimentado con cualquiera de sus sentidos es algún tipo de combinación de electrones, protones y neutrones, junto con las tres fuerzas: gravitatoria, electromagnética y la fuerza nuclear fuerte que mantiene los protones y neutrones unidos. La historia de los electrones, protones y neutrones ya se había resuelto a principios de la década de 1930. Por aquel entonces, debía de ser irresistible imaginar que esos tres fermiones constituían realmente los ingredientes fundamentales del universo, las piezas de Lego básicas a partir de las cuales se construyen todas las demás cosas. Pero la naturaleza nos tenía reservada alguna sorpresa más.

La primera persona que comprendió el funcionamiento básico de los fermiones fue el físico británico Paul Dirac, quien, a finales de la década de 1920, escribió una ecuación que describía el electrón. Una consecuencia inmediata de la ecuación de Dirac, aunque los físicos tardaron mucho tiempo en aceptarla, era que cada fermión tenía asociada una partícula de tipo opuesto, su «antipartícula». Las partículas de antimateria tienen exactamente la misma masa que sus homólogas de materia, pero carga eléctrica opuesta. Cuando una partícula y su antipartícula entran en contacto normalmente se aniquilan mutuamente, dando lugar a la emisión de radiación energética. Acumular una cantidad de antimateria es (en teoría) una estupenda manera de almacenar energía, lo cual ha alimentado la especulación sobre métodos avanzados de propulsión de cohetes en las historias de ciencia ficción.

La teoría de Dirac se hizo realidad en 1932, cuando el físico estadounidense Carl Anderson descubrió el positrón, la antipartícula del electrón. Existe una simetría precisa entre materia y antimateria: no hay duda de que una persona compuesta de antimateria llamaría «materia» a las partículas de las que estuviese hecha, y nos acusaría a nosotros de estar formados de antimateria. Sin embargo, el universo que observamos está repleto de materia y contiene muy poca

antimateria. La razón por la que esto es así continúa siendo un misterio para los físicos, aunque hay varias hipótesis prometedoras.

Anderson estaba estudiando los rayos cósmicos, partículas de alta energía provenientes del espacio que, al chocar con la atmósfera terrestre, dan lugar a otras partículas, que son las que acaban llegando a la superficie, donde nos encontramos. Es como si utilizásemos el aire que hay sobre nosotros como un gigantesco detector de partículas.

Para crear imágenes de los rastros de las partículas cargadas, Anderson utilizó una asombrosa tecnología denominada «cámara de niebla». El nombre es muy apropiado, porque el principio en el que se basa es similar al de la niebla que a veces cubre el cielo. Se llena una cámara de gas supersaturado con vapor de agua. «Supersaturado» significa que el vapor de agua en realidad quiere formar pequeñas gotas de agua líquida, pero no lo hará si no recibe un estímulo externo. En una niebla normal, ese estímulo llega normalmente en forma de alguna mota de impureza, como polvo o sal; en una cámara de niebla, se produce cuando una partícula la atraviesa. La partícula choca con los átomos en el interior de la cámara, les arranca electrones y los convierte en iones, que actuarán como núcleos alrededor de los cuales se formen las diminutas gotas de agua. De manera que una partícula cargada dejará un rastro de gotitas tras de sí, similar a la estela que crea un avión, como prueba evanescente de su paso.

Anderson subió su cámara de niebla, envuelta en un potente imán, al tejado de la Escuela de Aeronáutica del Instituto Tecnológico de California (Caltech), para detectar rayos cósmicos. Para obtener en su interior el vapor debidamente supersaturado era necesario un descenso rápido de la presión, producido mediante un pistón que provocaba un gran estruendo cada vez que se disparaba. La cámara solo se ponía en funcionamiento por las noches, debido a la enorme cantidad de electricidad que consumía. Cada noche, los golpes se podían oír en toda Pasadena, una ruidosa prueba de que estaban descubriendo los secretos del universo.

Las imágenes que obtuvo Anderson reflejaban un número similar de partículas

que describían trayectorias curvas en ambos sentidos, horario y antihorario. La explicación más evidente era simplemente que la radiación contenía el mismo número de protones y electrones. De hecho, eso es lo que cabría esperar, ya que no se pueden crear partículas de carga negativa sin crear simultáneamente la misma cantidad de carga positiva que la contrarreste. Pero Anderson contaba con un dato adicional que le sería muy útil: el grosor del rastro de iones que quedaba en la cámara. Se dio cuenta de que, de acuerdo con la curvatura de los rastros, los protones que los produjesen deberían desplazarse a una velocidad relativamente lenta (en este contexto, eso significa «inferior al 95 por ciento de la velocidad de la luz»), en cuyo caso los rastros de iones serían más gruesos que los que se observaban. Parecía que las misteriosas partículas que atravesaban la cámara tenían carga positiva, como el protón, pero eran relativamente ligeras, como el electrón.

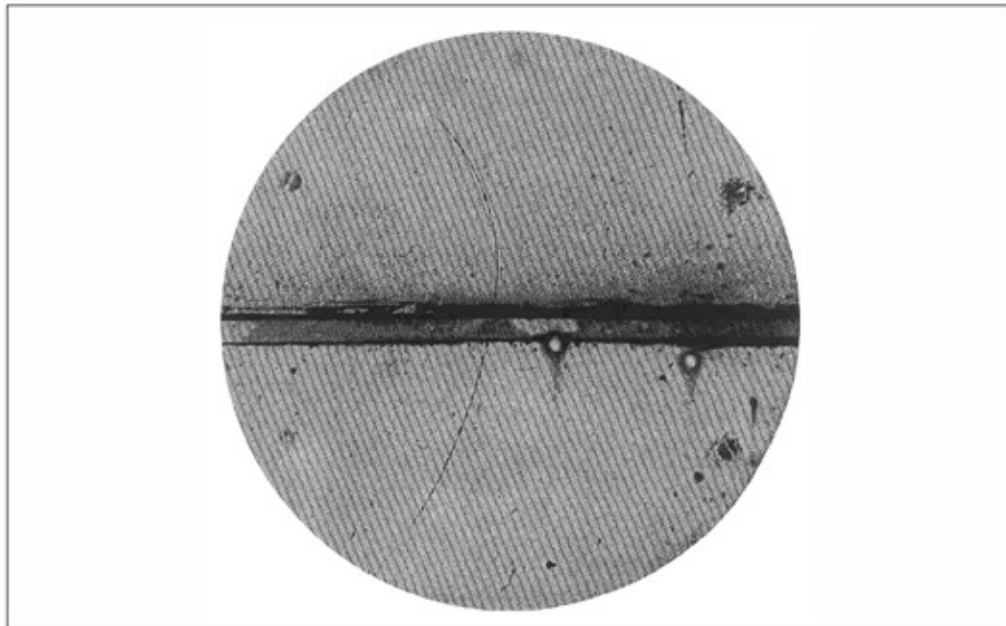


Imagen del descubrimiento del positrón en la cámara de niebla de Carl Anderson. La trayectoria del positrón es la línea curva que parte de la zona inferior de la imagen, llega a la placa en el centro, y se curva de forma más pronunciada mientras continúa su recorrido hacia la parte superior de la imagen.

Cabía otra posibilidad lógica: quizá eran los rastros de electrones que se movían hacia atrás. Para comprobar esta hipótesis, Anderson introdujo en la cámara una placa de plomo que la dividía por la mitad. Una partícula que fuese de un lado del plomo al otro sufriría una pequeña ralentización, lo que indicaría claramente cuál era la dirección de su trayectoria. En una imagen famosa en la historia de la física de partículas, se puede ver una partícula que atraviesa la cámara girando en sentido antihorario, atraviesa el plomo, y después reduce su velocidad: es el descubrimiento del positrón. Varios de los gigantes de este campo, como Ernest Rutherford, Wolfgang Pauli y Niels Bohr, se mostraron incrédulos en un primer momento, pero un buen experimento siempre prevalecerá sobre la intuición teórica, por muy brillante que esta sea. La idea de la antimateria había llegado al mundo de la física de partículas para quedarse.

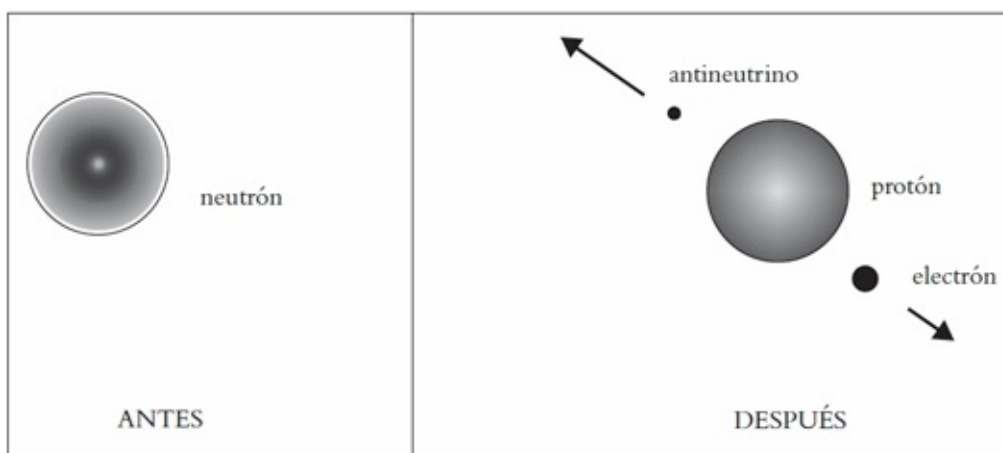
NEUTRINOS

Así que, en lugar de tres fermiones (protón, neutrón y electrón), tenemos tres más (antiprotón, antineutrón, positrón), hasta un total de seis, que sigue siendo una cifra bastante razonable. Pero los problemas no habían desaparecido. Por ejemplo, cuando los neutrones se desintegran se convierten en protones emitiendo electrones. Mediciones detalladas de este proceso parecían indicar que la energía no se conservaba: la energía total del protón y el electrón era siempre algo menor que la del neutrón del que procedían.

Fue Wolfgang Pauli, en 1930, quien propuso la solución a este rompecabezas, al darse cuenta de que la energía adicional podría corresponder a una diminuta partícula neutra que sería difícil de detectar. La llamó «neutrón», porque aún no se le había puesto ese nombre a la partícula también neutra, pero más pesada, que se encuentra en el núcleo. Cuando esto ocurrió, para evitar la confusión, Enrico Fermi denominó a la partícula de Pauli «neutrino», que en italiano

significa «neutro y pequeño».

De hecho, en la desintegración de un neutrón se emite lo que hoy conocemos como un antineutrino, pero el principio era absolutamente correcto. A Pauli no le hizo ninguna gracia por aquel entonces proponer la existencia de una partícula que parecía indetectable, pero a día de hoy los neutrinos son algo de lo más habitual para los físicos de partículas (como también lo es proponer hipotéticas partículas difíciles de observar).



Desintegración del neutrón en un protón, un electrón y un antineutrino.

Aún quedaba por resolver la cuestión del proceso exacto por el que los neutrones se desintegran. Cuando las partículas interactúan entre sí, es porque existe algún tipo de fuerza, pero la desintegración del neutrón no era lo que cabía esperar de la gravedad, el electromagnetismo o la fuerza nuclear. Así que los físicos empezaron a atribuírsela a la «fuerza nuclear débil», porque era evidente que tenía algo que ver con los nucleones, pero también que no era la fuerza que los mantenía unidos, que pasó a denominarse «fuerza nuclear fuerte».

La existencia del neutrino propició una curiosa simetría entre las partículas elementales. Había dos partículas ligeras, el electrón y el neutrino, que acabarían denominándose «leptones», palabra derivada del griego que significa

«pequeño». Y había dos partículas pesadas, el protón y el neutrón, que (algún tiempo después) acabarían recibiendo el nombre de «hadrones», palabra derivada del griego que significa «grande». Los hadrones son sensibles a la fuerza nuclear fuerte, mientras que los leptones no. Cada categoría incluía una partícula cargada y otra neutra. No era tan descabellado pensar que habíamos resuelto el enigma.

GENERACIONES

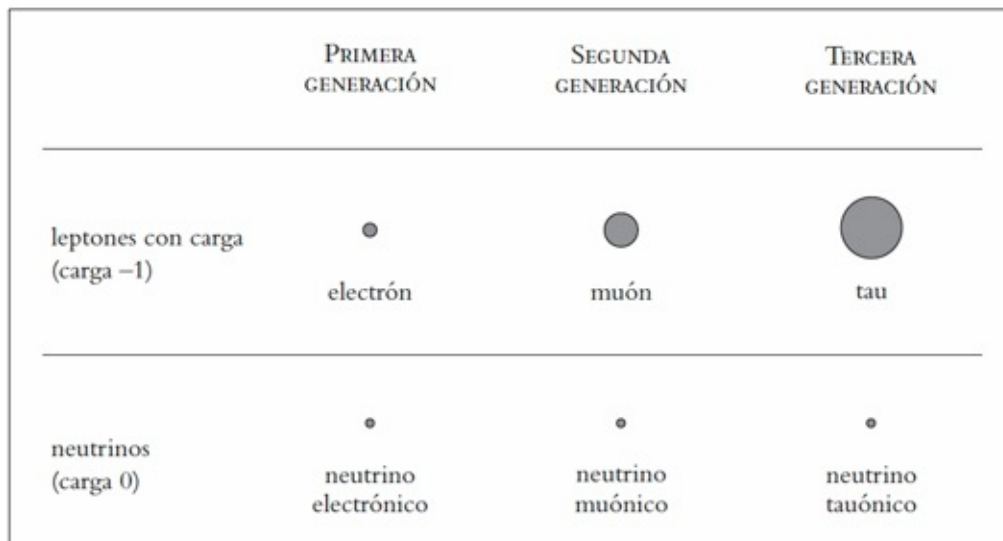
Entonces, en 1936 llegó un visitante desde el espacio: el muón. Carl Anderson, descubridor del positrón, y Seth Neddermeyer habían retomado el estudio de los rayos cósmicos y descubrieron una partícula con la misma carga negativa que el electrón, pero más pesada, aunque no tanto como lo sería el antiprotón. Recibió el nombre de «mesón mu», pero más adelante los físicos se dieron cuenta de que no se trataba de un mesón (es decir, un bosón compuesto por un quark y un antiquark), por lo que el nombre se quedó en «muón». Durante un tiempo, en los años treinta, la mitad de todas las partículas elementales conocidas (electrón, positrón, protón, neutrón, muón y antimuón) habían sido descubiertas en el laboratorio de Carl Anderson en Caltech. Quién sabe, quizá dentro diez o veinte años, la mitad de las partículas que entonces se conozcan se habrán descubierto en el LHC.

El muón fue una absoluta sorpresa. Ya teníamos el electrón, ¿por qué habría este de tener un primo más pesado? I. I. Rabi plasmó en pocas palabras el desconcierto que sintieron entonces los físicos en su famosa ocurrencia: «¿Y esto quién lo ha pedido?». Ese es exactamente el tipo de respuesta que esperamos recibir de los experimentos del LHC; descubrir algo completamente inesperado que nos obligue a revisar nuestras teorías.

No era más que el principio. En 1962, los físicos experimentales Leon Lederman, Melvin Schwartz y Jack Steinberger demostraron que en realidad

existen dos tipos de neutrinos. Están los neutrinos electrónicos, que interactúan con los electrones y a menudo se crean al mismo tiempo que estos, pero también existen los neutrinos muónicos, que van de la mano de los muones. Cuando el neutrón se desintegra, emite un electrón, un protón y un antineutrino electrónico; cuando es el propio muón el que se desintegra, emite un electrón y un antineutrino electrónico, pero también un neutrino muónico.

Y el proceso se repitió de nuevo. En los años setenta se descubrió la partícula tau, que también tenía la misma carga negativa que el electrón, pero era aún más pesada que el muón. Estas tres partículas resultaron ser primas casi idénticas, que solo se diferenciaban por su masa. En concreto, todas ellas eran sensibles a las fuerzas débil y electromagnética, pero no a la interacción fuerte. Y el tau tiene su propio tipo de neutrino, cuya existencia se predijo hace mucho tiempo pero que no se detectó directamente hasta el año 2000.



Los leptones del Modelo Estándar, ordenados en tres generaciones. Los círculos más grandes indican que las partículas tienen mayor masa, aunque no están a escala.

Así es como hemos llegado a tener no menos de seis leptones, agrupados en tres «familias» o «generaciones»: el electrón y su neutrino, el muón y su

neutrino, y el tau y su neutrino. Es completamente natural preguntarse si existe una cuarta generación, o incluso más, agazapadas en algún lugar. A día de hoy, lo único que podemos decir con toda seguridad es que puede que las haya y puede que no, aunque tenemos alguna evidencia de que no existen más que tres generaciones. Los neutrinos que conocemos tienen masas muy pequeñas, sin duda mucho menores que la del electrón. Sabemos cómo buscar nuevas partículas ligeras: analizando cuidadosamente la desintegración de otras más pesadas. Podemos contar cuántas partículas de tipo neutrino debería haber para dar cuenta de dichas desintegraciones, y la respuesta es tres. Es imposible estar seguros de que no existen más, quizá con masas anómalamente grandes, pero es posible que hayamos encontrado todos los neutrinos que hay (y por tanto todas las generaciones de leptones).

QUARKS Y HADRONES







Entretanto, los hadrones no se han estado quietos que digamos. La invención, a principios del siglo xx, de los aceleradores de partículas hizo que aumentase de manera espectacular el número de partículas supuestamente elementales descubiertas por los físicos, entre las que se encontraban los piones, los kaones, los mesones eta y rho o los hiperones, entre otras. Willis Lamb, en su discurso de aceptación del premio Nobel en 1955, bromeó al respecto: «Antes, a quien descubría una nueva partícula le daban el Nobel; hoy en día le deberían poner una multa de diez mil dólares».

Todas estas nuevas partículas eran hadrones (que, a diferencia de los leptones, interactuaban con neutrones y protones a través de la fuerza nuclear fuerte). Los físicos empezaron a sospechar que las recién llegadas no eran realmente «elementales», sino que reflejaban algún tipo de estructura más profunda.

Fueron Murray Gell-Mann y George Zweig, en 1964, quienes finalmente dieron con la clave, al proponer de manera independiente que los hadrones

estaban compuestos por partículas más pequeñas, denominadas «quarks». Como los leptones, existen quarks de distintos sabores: «up» («arriba»), «down» («abajo»), «charm» («encanto»), «strange» («extraño»), «top» («cima») y «bottom» («fondo»). Los quarks up, charm y top poseen una carga eléctrica de $+2/3$, mientras que la de los down, strange y bottom es de $-1/3$, por lo que a veces se dividen en quarks «de tipo up» y «de tipo down», respectivamente.

A diferencia de los leptones, cada sabor de quark representa en realidad un triplete de partículas, en lugar de solo una. Los tres tipos que existen de cada uno de los quarks reciben nombres de colores: rojo, verde y azul. Estos nombres son curiosos, pero no son realistas: no podemos ver los quarks, pero si los viésemos no tendrían esos colores.

	PRIMERA GENERACIÓN	SEGUNDA GENERACIÓN	TERCERA GENERACIÓN
quarks de tipo up (carga $+2/3$)			
	up	charm	top
quarks de tipo down (carga $-1/3$)			
	down	strange	bottom

Los leptones del Modelo Estándar, ordenados en tres generaciones. Los círculos más grandes indican que las partículas tienen mayor masa, aunque no están a escala.

Los quarks están «confinados», lo que significa que solo existen en ciertas combinaciones en el interior de los hadrones, pero nunca aislados por sí solos.

Cuando se combinan, siempre lo hacen en grupos «incoloros». El protón y el neutrón tienen cada uno en su interior tres quarks: dos up y un down, en el caso del protón; dos downs y un up, en el del neutrón. Uno de esos quarks será rojo, otro verde y otro azul, de manera que juntos den blanco, que a los efectos de esta analogía se considera incoloro. Más adelante veremos que también existen pares «virtuales» de quark y antiquark que surgen y desaparecen en el interior de los nucleones, pero lo hacen en combinaciones de color-anticolor, por lo que no afectan a la blancura global.

Resulta imposible no darse cuenta de que existen ciertos patrones comunes entre las figuras que representan las generaciones de leptones y las de quarks. En ambas existen seis tipos de partículas, clasificadas precisamente en tres pares, dentro de cada uno de los cuales las partículas difieren en una unidad de carga eléctrica. ¿Podría tener esta estructura una explicación más profunda? La respuesta es afirmativa, al menos en parte. Las dos partículas de cada par, como el electrón y su neutrino, serían idénticas de no ser por la intrusión del campo de Higgs que se extiende por todo el espacio vacío, reflejo del papel que tiene el campo de Higgs en la ruptura de simetrías, que estudiaremos con mucho más detalle a lo largo del libro.

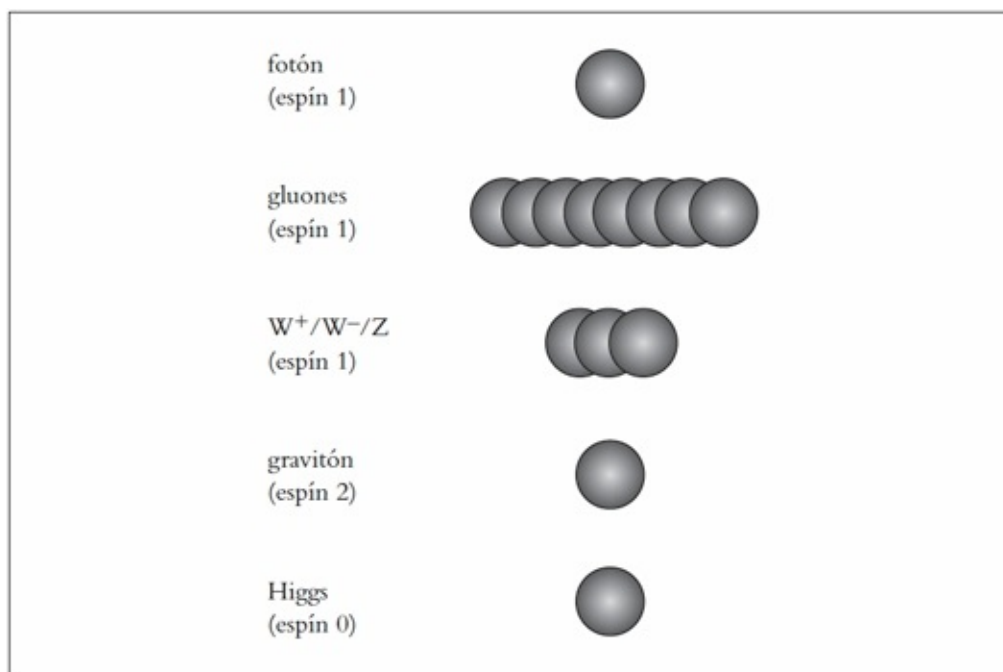
LA FUERZA QUE NO ENCAJA

Los fermiones del Modelo Estándar son los que le proporcionan a la materia que nos rodea su tamaño y su forma, pero son las fuerzas —y las partículas bosónicas asociadas a ellas— las que hacen posible que los fermiones interactúen entre sí. Los fermiones se atraen o se repelen entre sí intercambiando bosones, o bien pierden energía o se desintegran en otros fermiones emitiendo algún tipo de bosón. Sin los bosones, los fermiones no harían más que moverse indefinidamente en línea recta, sin verse afectados por ninguna otra cosa en el universo. Si el universo es tan endemoniadamente complejo e interesante es

porque todas estas fuerzas son distintas y hacen que las partículas se atraigan y se repelan de maneras complementarias.

Los físicos suelen decir que las fuerzas de la naturaleza son cuatro. No incluyen al Higgs, y no solo porque se tardase mucho tiempo en descubrir. El Higgs es diferente del resto de los bosones. Los demás son lo que se denomina «bosones de gauge» (que, como veremos en el capítulo 8, tienen una estrecha relación con las simetrías fundamentales de la naturaleza). El gravitón es un poco distinto de los demás. Cada partícula elemental posee un determinado «espín» intrínseco: el fotón, los gluones y los bosones W y Z tienen todos espín igual a uno, mientras que el del gravitón es dos. (Para más detalles, véase el apéndice 1.) Aunque aún no sabemos cómo reconciliar la gravedad con las exigencias de la mecánica cuántica, parece razonable seguir incluyéndolo entre los «bosones de gauge».

El Higgs, por su parte, es completamente diferente. Es lo que se denomina un bosón «escalar», lo que significa que su espín es cero. A diferencia del resto de los bosones, el Higgs no viene impuesto por una simetría ni por ningún otro principio profundo de la naturaleza. Un mundo sin el Higgs tendría un aspecto muy distinto, pero, como teoría física, sería perfectamente consistente. A pesar de su importancia, el Higgs constituye un cierto defecto en la hermosa estructura matemática del Modelo Estándar. Sin embargo, es un bosón, y por tanto susceptible de ser intercambiado entre otras partículas, dando así lugar a una fuerza de la naturaleza.



Los bosones del Modelo Estándar. (En este libro se incluyen los gravitones, cosa que no todo el mundo hace.) Todos los bosones, salvo los W, son eléctricamente neutros, y todos tienen masa nula, salvo los W, el Z y el Higgs.

El bosón de Higgs es una vibración del campo de Higgs, y el campo de Higgs es lo que hace que todas las partículas elementales con masa no nula posean dicha masa. Por tanto, el bosón de Higgs interactúa con todas las partículas de nuestro zoo que tienen masa: los quarks, los leptones con carga y los bosones W y Z. (Aún no disponemos de una explicación completa de la masa de los neutrinos, por lo que supondremos que no interactúan con el Higgs, aunque esto aún está por confirmar.) Cuanto mayor es la masa de una partícula, más intenso es su acoplamiento con el Higgs. En realidad, es al revés: cuanto más intensa es la interacción de una partícula con el Higgs, mayor es la masa que acumula al atravesar el campo de Higgs que se extiende por el espacio vacío.

Esta característica del Higgs —el hecho de que interactúa con más intensidad con las partículas de mayor masa— es absolutamente fundamental para su estudio en el LHC. El Higgs es en sí mismo una partícula pesada, y no somos

capaces de verlo directamente ni siquiera cuando lo producimos, pues se desintegra muy rápidamente en otras partículas. Esperamos que exista una cierta tasa de desintegración en (por ejemplo) bosones W , otra diferente para su desintegración en quarks bottom, otra para los mesones tau, etcétera. Pero no son aleatorias: sabemos exactamente cómo debe interactuar el Higgs con otras partículas (porque sabemos cuáles son sus masas), de manera que podemos calcular con gran precisión la frecuencia esperada para los distintos tipos de desintegración.

Lo que realmente deseamos es estar equivocados. Descubrir el Higgs supone un gran logro, pero cuando las cosas se ponen interesantes de verdad es cuando algo nuevo nos sorprende. Buscar partículas invisibles que son difíciles de producir y que se desintegran rápidamente en otras partículas es una tarea exigente, que implica paciencia, precisión y un meticuloso análisis estadístico. La buena noticia es que las leyes de la física (o cualquier otra hipotética versión de las mismas) no tienen piedad: las predicciones sobre lo que deberíamos ver son precisas e inalterables. Si el Higgs resulta ser distinto de lo que esperamos, eso constituirá una clara señal del fracaso del Modelo Estándar, y de que, por fin, se abre ante nosotros la puerta hacia nuevos fenómenos.

La historia del acelerador

Donde repasamos la curiosa historia del insólito pasatiempo de hacer que choquen entre sí partículas con energías cada vez más altas.

Cuando tenía unos diez años, descubrí la sección de ciencia de la biblioteca pública del condado Lower Bucks, en Pensilvania. Me quedé fascinado al instante. Mis libros favoritos estaban en la sección de astronomía y física (las categorías 520 y 530, según el venerable sistema decimal de Dewey). Uno de los textos sobre los que me abalanzaba con mayor avidez era un discreto volumen titulado *High Energy Physics*, de Hal Hellman. Yo lo leía a finales de la década de 1970, pero el libro había sido escrito en 1968, antes de que el Modelo Estándar se hubiese formulado como tal, cuando los quarks aún eran especulaciones teóricas de nombre imponente. Pero para entonces sí se había descubierto una profusión de hadrones, y el libro estaba repleto de evocadoras fotografías de rastros de partículas, cada uno de los cuales constituía un vistazo fugaz a los secretos de la naturaleza.

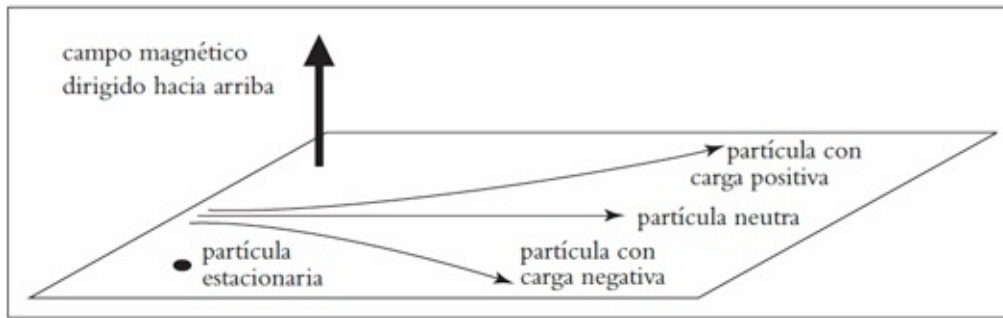
Muchas de esas fotografías se habían tomado en el poderoso Bevatrón, uno de los aceleradores punteros durante los años cincuenta y sesenta. Se encontraba en Berkeley, California, pero no es de ahí de donde le viene el nombre, sino de los «miles de millones de electronvoltios» de energía que el acelerador era capaz de alcanzar. (Como explicaré más adelante, el electronvoltio es una extraña unidad de energía muy del agrado de los físicos de partículas.) Mil millones se denotan con el prefijo «giga-», de manera que mil millones de electronvoltios son un GeV, pero en aquella época los estadounidenses solían utilizar «BeV». Además,

«Gevatrón» no suena muy bien.

El Bevatrón contribuyó a dos premios Nobel: el de 1959, para Emilio Segrè y Owen Chamberlain, por el descubrimiento del antiprotón, y el de 1968, para Luis Álvarez, por el descubrimiento de innumerables partículas (todos esos insidiosos hadrones). Poco tiempo después, Álvarez y su hijo Walter fueron los primeros en demostrar que la causa más probable de la extinción de los dinosaurios fue el impacto de un asteroide, al descubrir una concentración anómalamente elevada de iridio en los estratos geológicos que se formaron por aquel entonces.

La idea en la que se basan los aceleradores de partículas es sencilla: Se toman unas cuantas partículas, se aceleran a velocidades muy altas y se hace que choquen con otras partículas mientras se observa minuciosamente el resultado. Hay quien compara este procedimiento con hacer que choquen entre sí dos relojes suizos y después intentar comprender de qué están compuestos observando las piezas que salen despedidas. Por desgracia, esta analogía explica el proceso al revés. Cuando hacemos que colisionen las partículas, no queremos saber de qué están compuestas: estamos intentando crear nuevas partículas que no existían antes de las colisiones. Es como hacer que choquen dos relojes Timex esperando que las piezas se recombinen en un Rolex.

Para alcanzar esas velocidades, los aceleradores parten de un principio básico: las partículas cargadas (como los electrones y los protones) pueden recibir impulso mediante campos eléctricos y magnéticos. En la práctica, los campos eléctricos se utilizan para acelerar las partículas a velocidades cada vez más elevadas, y los campos magnéticos para hacer que se muevan en la dirección correcta, como por ejemplo alrededor de los tubos circulares del Bevatrón o del LHC. Ajustando cuidadosamente esos campos para que proporcionen a las partículas el impulso y la dirección adecuadas, los físicos pueden reproducir condiciones que, de otro modo, nunca se habrían visto aquí en la Tierra. (Los rayos cósmicos pueden alcanzar energías aún mayores, pero son poco frecuentes y difíciles de observar.)



Influencia de un campo magnético sobre partículas en movimiento. Si el campo magnético está dirigido hacia arriba, empuja a las partículas de carga positiva en dirección contraria a las agujas del reloj; a las de carga negativa, en la dirección de las agujas del reloj; y no tiene efecto alguno sobre las partículas neutras. Por su parte, las partículas estacionarias permanecen en reposo.

Está claro cuál es el reto tecnológico: acelerar las partículas a la mayor energía posible, hacer que choquen entre sí y observar qué nuevas partículas se crean. Ninguno de esos pasos es sencillo. El LHC supone la culminación de décadas de trabajo invertidas en aprender cómo construir mejores y mayores aceleradores.

$$E = mc^2$$

Cuando se crearon antiprotones en el Bevatrón, no fue porque estos estuviesen previamente ocultos dentro de los protones y de los núcleos atómicos con los que trabajaban, sino que las nuevas partículas surgieron de las propias colisiones. En términos de la teoría cuántica de campos, las ondas que representan a las partículas originales dieron lugar a nuevas vibraciones en el campo de antiprotones, que se detectaron en forma de partículas.

Para que eso suceda, el requisito fundamental es disponer de energía suficiente. La idea que hace posible la física de partículas es la famosa ecuación de Einstein, $E = mc^2$, que afirma que la masa es en realidad una forma de energía. En particular, la masa de un objeto es la energía mínima que puede

poseer dicho objeto. Cuando el objeto se encuentra en perfecto reposo, a su aire, la cantidad de energía que posee es igual a su masa multiplicada por la velocidad de la luz al cuadrado. La velocidad de la luz es un número grande, 300.000 kilómetros por segundo, pero su papel aquí se limita a transformar las unidades de medida de masa en las de energía. A los físicos de partículas les gusta utilizar un sistema de unidades en el que la velocidad se mide en años luz por año, en cuyo caso c es igual a la unidad, y masa y energía son realmente intercambiables: $E = mc^2$.

¿Y qué sucede cuando el objeto está en movimiento? A veces, al explicar la relatividad se dice que la masa aumenta cuando la partícula se aproxima a la velocidad de la luz, pero eso puede llevar a confusión. Es preferible pensar que la masa de un objeto es fija, mientras que su energía aumenta a medida que va ganando velocidad. La masa es la energía que el objeto tendría si no se moviese, que por definición no varía aunque esté en movimiento. De hecho, la energía sin límite al acercarse a la velocidad de la luz. Esta es una manera de entender por qué la velocidad de la luz constituye un límite absoluto a lo rápido que pueden moverse los objetos: sería necesaria una energía infinita para que un objeto con masa se desplazase a esa velocidad. (Las partículas de masa nula, por su parte, siempre se mueven exactamente a la velocidad de la luz.) Cuando un acelerador de partículas lleva los protones a energías cada vez más altas, por mucho que se aproximen a la velocidad de la luz, nunca la alcanzan.

Gracias a la magia de esta sencilla ecuación, los físicos de partículas son capaces de crear partículas pesadas a partir de otras más ligeras. En una colisión, la energía total se conserva, pero no sucede lo mismo con la masa total. La masa no es más que una forma de energía, y la energía puede transformarse de una forma a otra siempre que la cantidad total sea constante. Cuando dos protones chocan a gran velocidad, pueden convertirse en partículas más pesadas si su energía total es suficientemente grande. Podemos incluso hacer que colisionen partículas cuya masa es absolutamente nula y crear otras con masa: dos fotones pueden chocar y dar lugar a un par electrón-positrón, o dos gluones, también sin

masa, pueden unirse para crear un bosón de Higgs, siempre que su energía conjunta sea mayor que la masa del Higgs. La masa del bosón de Higgs es más de cien veces mayor que la del protón, y esta es una de las razones por las que es tan difícil crearlo.

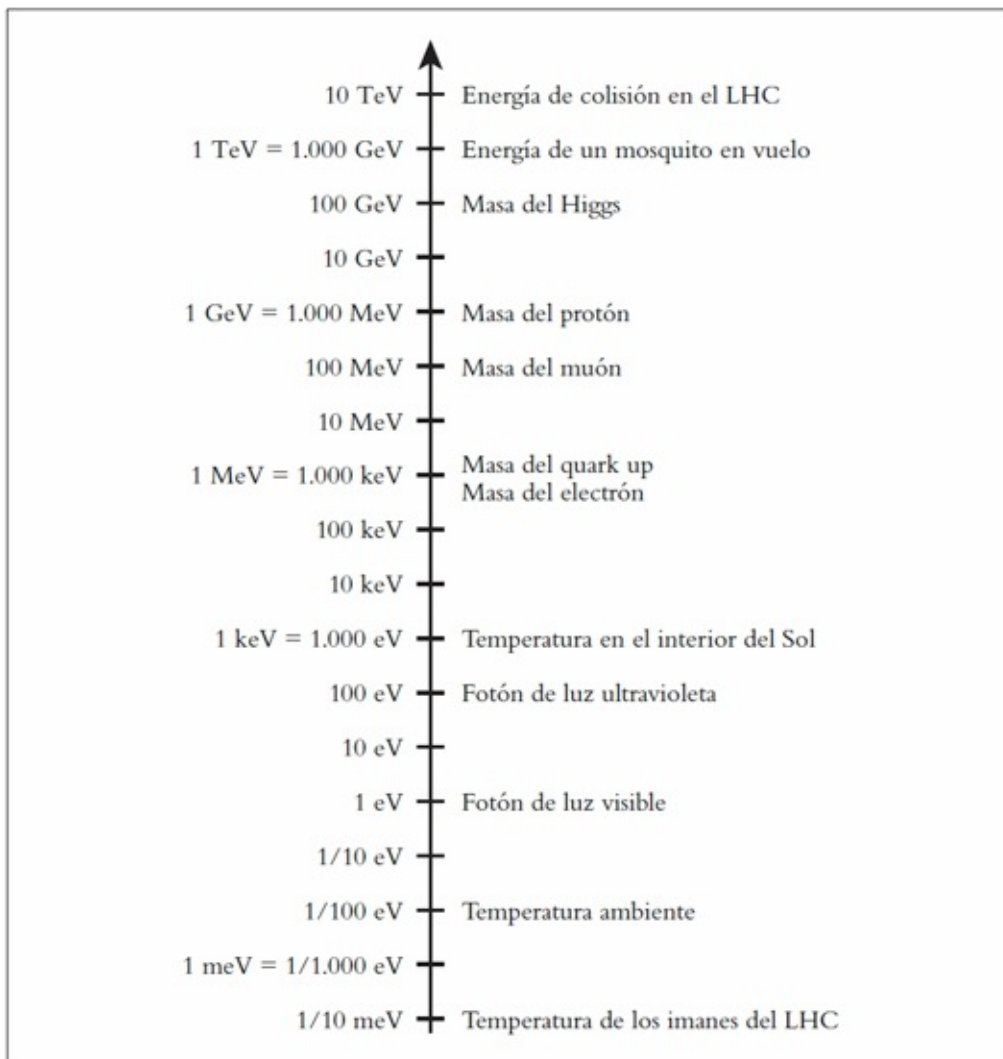
A los físicos de partículas nos gusta utilizar unidades de medida que no tienen ningún sentido en el mundo exterior, ya que eso le confiere a nuestro trabajo un aura de exclusividad. Además, sería muy engorroso utilizar un conjunto de unidades para la masa y otro distinto para otras formas de energía, ya que estamos continuamente pasando de unas a otras. Así que, cada vez que nos encontramos con una cierta cantidad de masa, simplemente la multiplicamos por la velocidad de la luz al cuadrado para convertirla en energía. De esta manera, podemos medir todo en unidades de energía, que es mucho más cómodo.

La unidad de energía favorita de los físicos de partículas es el electronvoltio, o «eV», para abreviar. Un eV es la cantidad de energía necesaria para mover un electrón a través de un voltio de potencial eléctrico. Dicho de otro modo, hace falta una energía de nueve electronvoltios para mover un electrón del polo positivo al negativo de una batería de nueve voltios. No es que los físicos se pasen el rato moviendo electrones a través de baterías, pero lo cierto es que es una unidad cómoda que se ha convertido en la habitual en este campo.

Un electronvoltio es una cantidad de energía muy pequeña. La energía de un solo fotón de luz visible es de aproximadamente un par de electronvoltios, mientras que la energía cinética de un mosquito al volar es de un billón de eV. (El mosquito está compuesto de muchísimos átomos, por lo que la energía por partícula es muy pequeña.) La energía que se libera al quemar un litro de gasolina supera los 10²⁷ eV, mientras que la energía nutricional de un Big Mac (700 calorías) equivale aproximadamente a 10³⁵ eV. Como puede apreciar el lector, un eV es una cantidad de energía realmente pequeña.

Puesto que la masa es una forma de energía, las masas de las partículas elementales también se miden en electronvoltios. La masa del protón o del neutrón es de casi mil millones de electronvoltios, mientras que la del electrón es

de medio millón de eV. La del bosón de Higgs que se descubrió en el LHC es de 125.000 millones de eV. Como un electronvoltio es tan pequeño, suele ser más cómodo utilizar como unidad el GeV, o gigaelectronvoltio (mil millones de electronvoltios). También es frecuente ver el keV (kiloelectronvoltio; mil electronvoltios), MeV (megaelectronvoltio; un millón de electronvoltios) y el TeV (teraelectronvoltio; un billón de electronvoltios). En 2012, el LHC hizo chocar protones con una energía total de 8 TeV, y su objetivo es alcanzar los 14 TeV, energía más que suficiente para producir bosones de Higgs y otras partículas exóticas. Lo difícil es detectarlas una vez que se han creado.



Escala de energías. Los físicos de partículas emplean la misma escala, cuya unidad básica es el electronvoltio, para medir la temperatura, la masa y la energía. Entre sus múltiplos y submúltiplos más comunes están el meV (una milésima de eV), el keV (mil eV), el MeV (un millón de eV), el GeV (mil millones de eV) y el TeV (un billón de eV). Algunos valores son aproximados.

Podemos incluso utilizar las mismas unidades para medir la temperatura, ya que esta no es más que una medida de la energía media de las partículas de una sustancia. Así, la temperatura ambiente equivale a tan solo dos centésimas de electronvoltio, mientras que la temperatura en el núcleo del Sol es de aproximadamente 1 keV. Cuando la temperatura supera la masa de cierta partícula, eso significa que las colisiones poseen energía suficiente como para crear dicha partícula. Incluso el núcleo, que está bastante caliente, no lo está, ni remotamente, como para producir electrones (0,5 MeV), y mucho menos aún protones o neutrones (alrededor de 1 GeV cada uno). Poco después del big bang, en cambio, la temperatura era tan elevada que eso no suponía ningún problema.

La manera más fácil que tiene la naturaleza de ocultarnos una partícula es hacer que sea tan pesada que no sea fácil producirla en el laboratorio. Este es el motivo por el que la historia de los aceleradores de partículas ha sido la de una búsqueda de energías cada vez más altas, y también es la razón por la que han recibido nombres como Bevatrón o Tevatrón. Llegar a energías nunca antes alcanzadas es literalmente como visitar un lugar que nadie ha visto antes.

DINAMIZANDO EUROPA

El nombre oficial del CERN, el laboratorio en Ginebra donde está situado el LHC, es Organización Europea para la Investigación Nuclear o, en francés, Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire. Como habrá visto el lector, el acrónimo no se corresponde con el nombre completo en ninguno de los dos idiomas. Esto se debe a que la «Organización» actual procede directamente

del Consejo Europeo para la Investigación Nuclear, Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, y se acordó mantener la abreviatura antigua aunque se cambiase el nombre oficial. Nadie se empeñó en cambiarla a «OERN».

El consejo se creó en 1954 por un grupo de doce países que buscaba revitalizar la física en la Europa de la posguerra. Desde entonces, el CERN ha estado en la punta de lanza de la investigación en física de partículas y física nuclear, y se ha constituido en un centro intelectual para la ciencia europea, así como en un componente importante de la identidad ginebrina. En la segunda ciudad más grande de Suiza, uno de los centros mundiales de las finanzas, la diplomacia y la fabricación de relojes, uno de cada dieciséis pasajeros que llegan al aeropuerto tiene alguna relación con el CERN. Cuando uno vuela hacia allí, es probable que en su mismo avión viajen uno o dos físicos de partículas.

Como sucede con la mayoría de los laboratorios de física de partículas, la historia del CERN ha sido la de una sucesión de máquinas cada vez más grandes que alcanzan energías cada vez más altas. En 1957 se ubicaba allí el Sincrociclotrón, que aceleraba protones a una energía de 0,6 GeV, y en 1959 se inauguró el Sincrotrón de Protones, que alcanzaba energías de 28 GeV. A día de hoy aún sigue en funcionamiento, proporcionando haces que se aceleran aún más en otras máquinas, incluido el CERN.

En 1971 se produjo un gran avance con los Anillos de Almacenamiento Intersecantes (ISR, Intersecting Storage Rings), que llegaron a los 62 GeV de energía total. El ISR, además de acelerador, era un colisionador de protones. Las máquinas anteriores aceleraban los protones y los dirigían contra bloques de materia estacionarios; el ISR hacía chocar entre sí haces que se movían en una dirección con otros que lo hacían en la dirección opuesta. Esta técnica constituye un reto tecnológico mucho mayor, pero también permite acceder a energías mucho más elevadas: no es solo que cada uno de los haces transporte energía, sino que toda esa energía está ahora disponible para crear nuevas partículas. (En los experimentos que emplean un objetivo fijo, mucha de la energía se desperdicia en impulsar dicho objetivo.) Durante la década de 1950, el físico

estadounidense Gerard K. O'Neill (que años más tarde se haría famoso por proponer la creación en otros planetas de hábitats para los humanos) estudió la posibilidad de construir un colisionador de partículas, y el físico austríaco Bruno Touschek construyó en Frascati (Italia) pequeños colisionadores electrón-positrón.

El ISR tenía casi tres kilómetros de circunferencia. Era grande, pero no tanto como su sucesor. El Supersincrotrón de Protones (SPS, Super Proton Synchrotron), con más de seis kilómetros y medio de circunferencia, se inauguró en 1976 y alcanzaba energías de 300 GeV. Pocos años más tarde, en una valiente decisión, el CERN adaptó el SPS para que, de su tarea original de acelerar protones, pasase a una nueva configuración en la que generaría colisiones entre protones y antiprotones. Como cabría suponer, es difícil hacer acopio de antiprotones y trabajar con ellos. No se encuentran simplemente por ahí como los protones. En primer lugar, hay que producirlos en colisiones de baja energía y, a continuación, es necesario llevar a cabo el complicado proceso de agruparlos evitando que choquen con algún protón del entorno y se aniquilen mutuamente en un destello de luz. Pero, una vez que se consigue hacer esto, es posible sacar provecho del hecho de que protones y antiprotones poseen cargas opuestas para hacer que describan trayectorias curvas en sentidos opuestos dentro de un mismo campo magnético. (En el LHC, las colisiones son de protones con protones, por tanto se deben utilizar dos haces separados, uno por cada dirección). El físico italiano Carlo Rubbia se sirvió del renovado SPS en 1983 para descubrir los bosones W y Z de la fuerza nuclear débil, por lo que recibió el premio Nobel en 1984.

El SPS aún existe, y sigue funcionando a pleno rendimiento. Gracias a las mejoras, ahora acelera protones a energías de 450 GeV y se los entrega al LHC, que hace que alcancen energías aún mayores. Los físicos de partículas son convencidos partidarios del reciclaje.

La siguiente gran máquina del CERN, el Gran Colisionador de Electrones y Positrones (LEP, Large Electron-Positron Collider), se inauguró en 1989. El LEP

requirió la construcción de otro túnel más, en este caso de veintisiete kilómetros de circunferencia y a cien metros de profundidad, situado a ambos lados de la frontera franco-suiza. Si esos números le suenan al lector, no es de extrañar: el túnel que se construyó originalmente para el LEP es el mismo en el que se encuentra ahora el LHC. Tras un fructífero período de funcionamiento, el LEP se clausuró en 2000, y se retiró su maquinaria para ceder su lugar al LHC.

EL GRAN COLISIONADOR DE ELECTRONES Y POSITRONES

Los protones son hadrones, partículas sensibles a la fuerza nuclear fuerte. Cuando chocan entre sí (o cuando la colisión tiene lugar entre un protón y un antiprotón), los resultados son un poco impredecibles. Lo que sucede realmente es que uno de los quarks o de los gluones que existen en el interior del hadrón choca contra un quark o un gluón del otro hadrón, pero no conocemos con precisión la energía inicial de ninguna de las dos partículas. Una máquina que produce colisiones entre electrones y positrones es un animal completamente diferente: su razón de ser es la precisión, no la fuerza bruta. Cuando chocan un electrón y un positrón, como en el LEP, sabemos exactamente lo que sucede, por lo que es más apropiado para medir con precisión las propiedades de las partículas ya conocidas que para descubrir otras nuevas. Si jugásemos a «¿Dónde está Wally?», un colisionador de hadrones sería como rastrear con la mirada todo el panorama en busca de la vistosa gorra de rayas, mientras que un colisionador electrón-positrón equivaldría a poner una fina cuadrícula sobre el dibujo y examinar las caras minuciosamente una por una.

El LEP era tan preciso que incluso fue capaz de descubrir la Luna. O, al menos, las mareas que esta provoca. A diario, el campo gravitatorio de la Luna tira de la Tierra en su movimiento de rotación alrededor de nuestro planeta. En el CERN, esta minúscula tensión hacía que la longitud total del túnel del LEP se estirase y se contrajese en aproximadamente un milímetro cada día. Poca cosa

para una tubería de veintisiete kilómetros, pero suficiente como para provocar una diminuta fluctuación en la energía de los electrones y los positrones, fácilmente detectable por instrumentos de alta precisión. Tras el desconcierto inicial que generaron las variaciones diarias de la energía, los físicos del CERN enseguida se dieron cuenta de lo que pasaba. (En esencia, esta manera de detectar la Luna no se diferencia demasiado del método que utilizan los astrofísicos para detectar materia oscura en el universo, a través de su efecto gravitatorio). El LEP también era capaz de detectar el paso de los trenes de alta velocidad a su llegada a Ginebra, cuyas fugas de corriente eléctrica conseguían perturbar las máquinas ajustadas con tanta precisión.

Pero los físicos del LEP no estaban ahí para detectar la Luna o los trenes; lo que querían era descubrir el bosón de Higgs. Y, durante un tiempo, creyeron que lo habían hecho.

Tras una muy fructífera vida útil tomando medidas de precisión de las propiedades del Modelo Estándar (que no supuso, sin embargo, el descubrimiento de ninguna nueva partícula), estaba previsto que el LEP se desconectase y se desmantelase en septiembre de 2000, para ceder su lugar al LHC. Sabiendo que a su máquina solo le quedaban unos pocos meses en funcionamiento, los técnicos lo apostaron todo al doble o nada, y aguzaron su ingenio para alcanzar los 209 GeV, una energía superior a la que contemplaban sus especificaciones de diseño. Si eso provocaba una avería, la situación no sería muy grave, puesto que el acelerador estaba a punto de jubilarse.

Cuando los haces alcanzaron ese nuevo valor de la energía, un equipo del experimento ALEPH liderado por Sau Lan Wu, de la Universidad de Wisconsin-Madison, detectó una serie de eventos que se distinguían del resto. Apenas unos pocos pero sugerentes indicios, pero precisamente lo que cabría esperar si existiese un bosón de Higgs con una masa de 115 GeV, justo en el límite de lo que el LEP era capaz de ver. Wu tenía en su haber varios logros importantes, incluido el premio de la Sociedad Europea de Física, que compartió en 1979 por un experimento que ayudó a determinar la existencia de los gluones. Le seguía la

pista de cerca al Higgs, y no iba a dejar escapar esa oportunidad así como así.

Normalmente, unos cuantos eventos en un detector de partículas no son razón suficiente para emocionarse, incluso aunque su apariencia concuerde perfectamente con la del Santo Grial que tanto sus colegas como ella misma llevaban años buscando. La física de partículas es cuestión de estadística: para prácticamente cualquier cosa que se puede observar en un detector existe más de una manera de que se produzca, y la clave está en comparar la frecuencia de ocurrencia que cabría esperar con la que se obtendría de existir una nueva partícula. De manera que, si unos pocos eventos generan dudas, no queda más remedio que recabar más datos. La intensidad de la señal aumentará, o bien se desvanecerá.

El problema es que no es posible recabar más datos cuando el laboratorio va a desconectar el acelerador. Wu y otros físicos solicitaron a Luciano Maiani, el físico italiano que en ese momento ejercía como director general del CERN, que ampliase la vida útil del LEP para poder recopilar más datos. Todo el mundo era consciente de la posible trascendencia del potencial descubrimiento, y del profundo remordimiento que sentirían si desconectaban la máquina justo antes de encontrar el Higgs. Detectar por primera vez una partícula elemental no es algo que suceda todos los días, y menos aún una tan fundamental para nuestra comprensión de la física. Como dijo entonces el físico Patrick Janot: «Estamos escribiendo un renglón de la historia de la humanidad». Sabían asimismo que tenían competencia: el acelerador Tevatrón del Fermilab, a las afueras de Chicago, también tenía al Higgs en su punto de mira, y cabía la posibilidad de que lo encontrase en los 115 GeV antes de que el LHC estuviese operativo. La colaboración internacional es muy importante en la física de partículas, pero en el interior de todo científico late un corazón competitivo.

Maiani, consciente de lo que estaba en juego, tomó una decisión de compromiso: el LEP se desconectaría, aunque su funcionamiento se ampliaría un mes más, hasta finales de octubre de 2000. La decisión no fue del agrado de quienes iban a la caza del Higgs, pero se pusieron manos a la obra para acumular

más datos en búsqueda de eventos que encajasen con lo que se esperaba que el Higgs produjese. Y los encontraron. Solo unos pocos, si bien desperdigados por los cuatro experimentos que se estaban llevando a cabo en el LEP, no solo en el detector ALEPH donde trabajaba el equipo de Wu. Pero también acumularon muchos más efectos «de fondo» que no se parecían en absoluto al Higgs.

Cuando el período de funcionamiento llegó a su fin, la relevancia estadística total de los eventos supuestamente debidos al Higgs de hecho había disminuido: la señal había acabado ahogada por el fondo. El LEP podía haber seguido en activo, pero eso habría supuesto un grave retraso en los planes de construcción del LHC, lo que habría hecho que aumentasen los costes y que la nueva máquina, más potente, hubiese tardado más en estar operativa. Por muy tentadora que fuese la idea de hacer un último intento de conseguir el premio gordo, había llegado la hora de la jubilación para el LEP, y de que otros aceleradores tomaran su relevo en la persecución.

SLAC, BROOKHAVEN, FERMILAB

El CERN ha sabido aglutinar los esfuerzos de muchos países europeos (y, más recientemente, de todo el mundo) para crear un laboratorio de física puntero, pero otras instalaciones también han sido escenario de avances importantes para nuestra comprensión de las partículas y las fuerzas. Tres laboratorios estadounidenses, en particular, han contribuido a encajar las piezas del Modelo Estándar: el SLAC, en la Universidad de Stanford, en California; el de Brookhaven, en Long Island, y el Fermilab, a las afueras de Chicago.

En un principio, el significado de las siglas SLAC era Stanford Linear Accelerator Center (Centro del Acelerador Lineal de Stanford), pero en 2008 el Departamento de Energía lo cambió oficialmente a SLAC Linear Accelerator Center, quizá porque alguno de sus mandamases sentía debilidad por la recursión infinita. (Es más probable que fuese porque la Universidad de Stanford no quería

que el Departamento de Energía se apropiase de un acrónimo que incluyese su nombre.) Fundado en 1962, el SLAC ocupa un lugar único en la física de partículas, por albergar un acelerador lineal de alta energía, una línea recta en lugar de un anillo circular. El edificio en el que está situado el acelerador tiene más de tres kilómetros de longitud, lo que lo convierte en el más largo de Estados Unidos, y el tercero de todo el mundo. (Los dos primeros son la Gran Muralla china y el Fuerte Ranikot, una fortificación militar paquistaní del siglo XIX.) Originalmente, el acelerador utilizaba electrones, que hacía chocar contra objetivos fijos. A partir de los años ochenta, se modificó para producir colisiones entre electrones y positrones y, más adelante, se le añadió un anillo, que se nutre de los productos del acelerador lineal.

El SLAC desempeñó un papel fundamental en el descubrimiento de varias partículas, incluidos el quark charm y el leptón tau, pero, sin duda, su contribución más importante fue la demostración de que la propia idea de los quarks era el camino a seguir. En 1990, el premio Nobel se les otorgó a Jerome Friedman y Henry Kendall, del MIT, y Richard Taylor, del SLAC, quien, en los años setenta, utilizó el haz de electrones del SLAC para examinar detalladamente la estructura interna de los protones. El equipo SLAC-MIT demostró que los electrones de baja energía atravesaban los protones sin sufrir desviaciones significativas, mientras que los de alta energía (que cabría esperar que los hubiesen atravesado con más facilidad todavía) tenían una mayor probabilidad de salir despedidos en ángulos extraños. Las partículas con energías altas se corresponden con vibraciones de sus campos de longitudes de onda cortas, y son por lo tanto capaces de distinguir lo que sucede en distancias muy cortas. Lo que los físicos estaban observando eran partículas muy pequeñas que vivían en el interior de los protones, lo que hoy en día conocemos como quarks.

El Laboratorio Nacional de Brookhaven se inauguró en 1947 y ha contribuido a siete premios Nobel, cinco en Física y dos en Química. El neutrino muónico, por el que Lederman, Schwartz y Steinberger compartieron el Nobel, se

descubrió en Brookhaven. Hoy en día, su contribución principal a la física de partículas se debe al Colisionador de Iones Pesados Relativistas (RHIC, Relativistic Heavy Ion Collider), un anillo de casi cuatro kilómetros de longitud que hace chocar entre sí núcleos pesados para crear un plasma de quarks y gluones como el que existió instantes después del big bang. Los responsables del Libro Guinness de los Récords han certificado que el RHIC ha sido el escenario donde se alcanzó la temperatura más elevada producida artificialmente: cuatro billones de grados centígrados, unas 250.000 veces la temperatura en el centro del Sol. El objetivo de la física que se lleva a cabo en el RHIC no es tanto la búsqueda de nuevas partículas como entender cómo se comportan los quarks y los gluones en circunstancias tan extremas.

El tercer gran complejo dedicado a la física de altas energías es el Acelerador del Laboratorio Nacional Fermi, o Fermilab. Especializado en anillos gigantes que aceleraban protones y antiprotones a altas energías, el Fermilab fue un competidor directo del CERN durante buena parte de su existencia. Se inauguró en 1967, bajo la dirección de Robert Wilson, científico polifacético y gestor innovador, famoso entre los físicos por su creatividad y su aparente capacidad para conseguir lo imposible. No solo logró que el laboratorio estuviese en funcionamiento antes de lo previsto y por un coste menor del presupuestado, sino que diseñó el edificio principal y creó personalmente muchas de las esculturas que decoran el lugar. Cuando Wilson, que había estudiado escultura durante una breve temporada en la Accademia di Belle Arti en Roma, propuso construir un obelisco de metal de diez metros para el laboratorio, le dijeron que la normativa exigía que toda la fundición la llevaran a cabo personas afiliadas al sindicato de soldadores. Su respuesta fue la natural (para él): se afilió al sindicato, se enroló como aprendiz del maestro soldador James Forester, del taller de maquinaria del Fermilab, y siguió diligentemente el correspondiente curso de formación. El obelisco, construido por Wilson en sus pausas para almorzar y durante los fines de semana, se instaló en 1978 en un estanque reflectante en el exterior del vestíbulo principal.

La joya del Fermilab era el Tevatrón, una enorme máquina que generaba colisiones de protones y antiprotones a energías de 2.000 GeV. (Recuerde que «TeV» proviene de «teraelectronvoltio», 1 billón de electronvoltios, es decir, 1.000 GeV.) Finalizado en 1983, el Tevatrón fue el acelerador de mayor energía de todo el mundo hasta que el LHC pasó a ocupar ese puesto en 2009. Su mayor logro fue el descubrimiento del quark top, anómalamente pesado, que se identificó finalmente en 1995. Gordon Watts, de la Universidad de Washington, que por aquel entonces era estudiante de doctorado en el Fermilab, recuerda el momento en que la señal superó el umbral de los «tres sigmas» (que se explica en el capítulo 9), decisivo para poder afirmar que había evidencia de una nueva partícula:

Estábamos en una reunión importante revisando todos los análisis que estaban a punto de hacerse públicos en una de las conferencias. Todos ellos reflejaban un pequeño exceso, tan pequeño que no era realmente significativo. De hecho, esa era la situación desde hacía un tiempo y todos estábamos ya acostumbrados, así que lo cierto es que lo ignoramos. Estábamos llegando al final de una de las maratónicas reuniones habituales y la sala estaba a rebosar. Yo estaba al fondo, sentado en el suelo. Hacía calor y el aire en la habitación estaba... cargado (por decirlo suavemente). Creo que estábamos a punto de escuchar la última de las charlas cuando una de las personas que había llegado lo suficientemente pronto como para hacerse con una silla levantó la mano: «Eh... Esperad un momento... Si hacemos algo tan sencillo como sumar todos los fondos y las señales, supera los tres sigmas». Se hizo el silencio en la habitación, todo el mundo se puso a revisar apresuradamente las notas de las charlas para comprobar si era cierto lo que decía. El siguiente en hablar fue el portavoz, o el coordinador, y fue para soltar una palabrota. Creo que todos sentimos el mismo escalofrío.

El largo tiempo deseado bosón de Higgs estaba fuera del alcance del Tevatrón. Con una energía y una luminosidad menores que las del LHC, la máquina estadounidense nunca tuvo grandes posibilidades de resultar ganadora en esa carrera. Pero después de que se desconectase el LEP, y antes de que el LHC entrase en funcionamiento, el Fermilab dispuso de una oportunidad en que pudo haber obtenido la primera evidencia concluyente de la misteriosa partícula. Finalmente, los físicos del Tevatrón lograron excluir la posibilidad de que el Higgs se encontrase en ciertos intervalos de masa, pero no pudieron afirmar que

hubiesen encontrado pruebas definitivas de su existencia.

Frente a la importante presión debida a la difícil situación presupuestaria, así como a las energías mucho más elevadas a las que podía funcionar el LHC, el Tevatrón se desconectó definitivamente el 30 de septiembre de 2011, poniendo fin así a la carrera del último colisionador de partículas de alta energía de relevancia situado en suelo estadounidense. (El Colisionador de Iones Pesados Relativistas lleva a cabo una labor importante en física nuclear, pero no compite por la búsqueda de nuevas partículas, ya que alcanza energías de menos de 10 GeV por nucleón.) A día de hoy, no se sabe si en algún momento tendrá un sucesor.

EL SUPERCOLISIONADOR

Por supuesto, se suponía que el Tevatrón iba a tener sucesor: el Supercolisionador Superconductor (SSC, Superconducting Super Collider), que en 1987 contaba con el apoyo del presidente Ronald Reagan y cuya entrada en funcionamiento en un principio estaba prevista para 1996. El SSC era un proyecto enormemente ambicioso, que incluía un nuevo anillo de 87 kilómetros de circunferencia, donde chocarían protones con energías de 40 TeV total, veinte veces más que en el Tevatrón. Con la perspectiva que da el tiempo, puede que fuese demasiado ambicioso. Al principio, el proyecto contó con muchos apoyos, cuando aún no se había decidido la ubicación del laboratorio: la delegación en el Congreso estadounidense de prácticamente todos y cada uno de los estados podía imaginar que conseguiría que el proyecto se implantase en su territorio, y cuarenta y tres de ellos se lo tomaron lo suficientemente en serio como para realizar estudios geológicos y económicos. El ganador final fue el pueblecillo de Waxahachie, en Texas, a unos cincuenta kilómetros al sur de Dallas.

Una vez que se hubo decidido la ubicación del SSC, el entusiasmo por el proyecto decayó rápidamente en cuarenta y nueve de las cincuenta delegaciones

estatales en el Congreso. En aquella época, había mucha presión para reducir el déficit federal, y el coste del SSC, que ya era inicialmente elevado, se había triplicado hasta alcanzar los 12.000 millones de dólares. La competencia de la Estación Espacial Internacional (ISS, International Space Station) resultó ser un factor adicional (a ojos de los funcionarios del gobierno, no para los científicos). El presupuesto de la NASA dedicado a la ISS era de más de 50.000 millones de dólares, o de más de 100.000 millones si se incluían los vuelos del transbordador espacial. A nadie se le escapaba que buena parte del dinero de ese gigantesco proyecto también iría a parar a Texas, ya que el control de las misiones se llevaba a cabo desde el Centro Espacial Johnson.

Le pregunté a JoAnne Hewett, que actualmente trabaja como física teórica en el SLAC, qué fue lo que la llevó a aceptar ese trabajo. Me respondió con una fecha muy concreta: el 21 de octubre de 1993, el día que el Congreso votó la cancelación definitiva del SSC. Hewett tenía ofertas del laboratorio del SSC y del SLAC, y estaba deseando participar de la emocionante atmósfera que se respiraba alrededor de la máquina que se estaba construyendo. Se pasó esa mañana de otoño viendo la sesión del Congreso por televisión, contemplando impotente cómo la votación caía del lado equivocado. Pasó la tarde apenada y después llamó al director del SLAC para aceptar su oferta. Allí ha tenido una carrera de éxito, construyendo nuevos modelos en física de partículas e inventando ingeniosas maneras de compararlos con los datos, pero uno no puede evitar preguntarse qué habría pasado si hubiese dispuesto de esos datos antes, y si estos proviniesen de colisiones de mayor energía.

Por aquel entonces, yo acababa de entrar como postdoc en el grupo de física teórica de partículas del MIT. Recuerdo una lúgubre reunión, en la que convocamos a toda la comunidad de físicos de la zona de Boston para juntarnos y hablar sobre cuáles debían ser nuestros siguientes pasos. Algunas cuestiones eran científicas: ¿existe alguna otra manera de contestar a las preguntas que el SSC habría tratado de responder? Otras eran más de índole práctica: ¿deberíamos apoyar que Estados Unidos hiciese una importante inversión en el

LHC, o seguir luchando aunque la batalla ya estuviese perdida? Y algunas eran incluso más prácticas: ¿hay alguna manera en que podamos ofrecer trabajos o puestos temporales a los científicos que se quedaron en la calle por el cierre del laboratorio del SSC?

Cuando se canceló el SSC, ya se habían gastado 2.000 millones de dólares en excavar parte del túnel y en construir algunas de las infraestructuras físicas necesarias. No es fácil precisar un único motivo para la decisión del Congreso de cancelar el proyecto, pero fueron habituales las quejas ante la reticencia de la dirección del SSC a establecer los debidos procedimientos burocráticos. Un informe de 1994, posterior a la cancelación, de un comité interno del Congreso, titulado *Fuera de control: Lecciones del Supercolisionador Superconductor*, detallaba numerosas acusaciones de malas prácticas en la gestión, como una constante y excesiva estimación a la baja de los costes, la incapacidad para llevar a cabo las revisiones internas obligatorias, y los problemas para comunicarse con el Congreso y con el propio Departamento de Energía. A veces las críticas rayaron en lo absurdo, como cuando la prensa se hizo eco de que el laboratorio había gastado 20.000 dólares en plantas (al final, resultó que esa cifra incluía el paisajismo). Entre los físicos, por su parte, se dejaba sentir la irritación por lo que consideraban excesos burocráticos. Roy Schwitters, que ocupaba el puesto de director del laboratorio del SLAC, rezongó así ante un periodista: «Los burócratas y los políticos no hacen más que ponernos zancadillas. El SSC va a acabar siendo víctima de la venganza de los estudiantes mediocres». Con la perspectiva que da la distancia, puede que, políticamente, esa no fuese una manera muy hábil de expresar su malestar.

Entretanto, los físicos se peleaban entre sí. Aunque la física de partículas recibe una importante proporción de la atención pública y del dinero invertido en investigación, es claramente un campo minoritario dentro del conjunto de toda la física. Solo el 7 por ciento de los miembros de la Sociedad Americana de Física (APS) pertenecen a la subdivisión de partículas y campos; el resto se identifican como investigadores en materiales y materia condensada, física atómica y

molecular, óptica, astrofísica, física de plasmas, dinámica de fluidos, biofísica u otras especialidades. A finales de la década de 1980 y principios de la de 1990, muchos de los practicantes de estas otras especialidades estaban bastante molestos con toda la atención y financiación que recibía la física de partículas, y para ellos el SSC era una muestra de hasta qué punto el orden de las prioridades no era el más adecuado.

Bob Park, director ejecutivo del departamento de relaciones institucionales de la APS en aquella época, dijo en 1987 que el SSC era «posiblemente el asunto que había provocado una mayor división entre la comunidad física en toda su historia». Philip Anderson, de Princeton, un reputado físico de la materia condensada que obtuvo el premio Nobel en 1977, hizo hincapié en la «irrelevancia prácticamente total de los resultados de la física de partículas no solo para la vida real, sino para el resto de la física», y afirmó que, aunque posiblemente el SSC sería positivo para la ciencia, quizá fuese preferible destinar ese dinero a otros fines. James Krumhansl, físico de materiales en Cornell y candidato a la presidencia de la APS, pensaba que el proyecto estaba detrayendo fondos de otros campos de investigación más rentables, y que la construcción de un nuevo acelerador de partículas debería esperar hasta que las tecnologías relacionadas con la superconductividad y el magnetismo estuviesen más desarrolladas. Los físicos de partículas suelen hacer un flaco favor a su causa al defender ante sus colegas que los avances en otros campos, como por ejemplo en el de las imágenes por resonancia magnética, se derivan del desarrollo de los aceleradores. Como declaró en 1991 Nicolaas Bloembergen, también premio Nobel y presidente de la APS: «Como uno de los pioneros en el campo de la resonancia magnética, puedo afirmar que este surgió como consecuencia de la ciencia a pequeña escala».

Ocultas en cierta medida tras las luchas sobre el control burocrático, las dificultades presupuestarias y las prioridades disciplinarias, quedaron cuestiones de más calado sobre el significado de la investigación básica y la importancia intrínseca de los descubrimientos. En 1993 había un nuevo presidente y también

eran nuevos muchos de los miembros del Congreso, que se habían comprometido a controlar el gasto público. El muro de Berlín había caído y la Unión Soviética se había hundido, poniendo fin a la guerra fría y a la consiguiente batalla por la superioridad tecnológica. Tras alcanzar su apogeo con el Proyecto Manhattan durante la Segunda Guerra Mundial, la influencia de los físicos de altas energías sobre las políticas nacionales había ido declinando progresivamente durante medio siglo. Las personas razonables pueden estar de acuerdo en que la búsqueda de una mejor comprensión del universo es importante, pero también lo es disponer de una sanidad apropiada y de una seguridad económica para los ciudadanos del país. Incluso durante las épocas de bonanza, es difícil encontrar el equilibrio entre estas distintas prioridades.

Una vez que el SSC se canceló definitivamente, los terrenos y las instalaciones pasaron a ser propiedad del estado de Texas, que durante mucho tiempo trató de venderlos a algún inversor privado. Finalmente lo logró en 2006, cuando un millonario de Arkansas llamado Johnnie Bryan Hunt compró el lugar por 6,5 millones de dólares. Su idea era convertir el complejo del SSC en un almacén de datos de la máxima seguridad informática. El laboratorio estaba equipado con líneas de alimentación eléctrica y de comunicaciones, y el lugar había sido cuidadosamente seleccionado para minimizar el riesgo de terremotos e inundaciones. Pero, ese mismo año, Hunt, que tenía setenta y nueve años, resbaló sobre una placa de hielo y murió como consecuencia de los daños cerebrales sufridos. Los planes para el centro de procesamiento de datos se abandonaron y la calma volvió al lugar que debía haber ocupado el SSC. Cuando escribo estas líneas, en 2012, el complejo ha sido comprado de nuevo por una empresa de productos químicos que espera construir allí una nueva fábrica, pese a las enérgicas reticencias de los vecinos. Sea cual sea el destino final del laboratorio del SSC, Waxahachie no tiene un papel importante en la búsqueda del bosón de Higgs.

Como muchos habían predicho, la cancelación del SSC no llevó a que aumentase el presupuesto de otros campos de la ciencia. De hecho, los miembros

del Congreso que tanto entusiasmo habían mostrado por los recortes gustosamente hicieron lo propio con el resto del presupuesto para la investigación. Este desafortunado episodio sí tuvo, no obstante, un vencedor reconocido: el Gran Colisionador de Hadrones. Cuando vieron truncado su sueño de disponer de una máquina de referencia, los físicos estadounidenses presionaron para que Estados Unidos se involucrase más a fondo en el LHC. Esa inyección de dinero contribuyó a ampliar el alcance del LHC, manteniendo viva la esperanza de que el Higgs no se nos escapase indefinidamente.

La máquina más grande jamás construida

Donde visitamos el Gran Colisionador de Hadrones, el prodigio de la ciencia y la tecnología que ha estado buscando el bosón de Higgs.

El 10 de septiembre de 2008, el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) cobró vida. Entre los vítores de miles de físicos de todo el mundo, los primeros protones circularon con éxito por el anillo. Corrió el champán, hubo discursos y palmaditas en la espalda, y por fin dio comienzo una nueva era de descubrimientos.

Nueve días después, estalló.

No todo el acelerador, evidentemente. El LHC está alojado en un túnel subterráneo a cien metros de profundidad y unos veintisiete kilómetros de circunferencia que atraviesa la frontera entre Suiza y Francia en las proximidades de Ginebra. Debería producirse un cataclismo inimaginable para que todo estallase. Pero las piezas individuales sí se pueden estropear.

Para que el LHC funcione, su interior debe mantenerse a muy baja temperatura. La máquina hace circular haces de protones a lo largo de dos tuberías distintas: una para los que se mueven en el sentido de las agujas del reloj y otra para los que lo hacen en sentido contrario, de manera que se pueda hacer colisionar dichos haces en determinados puntos, donde están situados los experimentos. Ambas tuberías atraviesan imanes superpotentes, cuya función es curvar con precisión la trayectoria de los protones para que tracen el recorrido predeterminado.

Crear campos magnéticos es fácil: basta con hacer que circule una corriente

eléctrica a través de un circuito cerrado. Para crear campos intensos, se necesita mucha corriente. Pero la mayoría de los materiales, incluso los cables de alta calidad, ofrecen cierta resistencia al flujo de corriente. El problema es que el cable se empieza a calentar y acaba, en última instancia, fundiéndose. Para evitar este problema, los cables se enfrían a temperaturas extraordinariamente bajas, tanto que se vuelven superconductores. Un superconductor no posee resistencia alguna, de manera que los cables no se calientan cuando una corriente los atraviesa. El LHC es el mayor frigorífico del mundo (y con mucha diferencia). El enfriamiento se logra utilizando helio líquido, que se mantiene a menos 269 grados centígrados, apenas 3,4 grados por encima del cero absoluto, la temperatura más baja posible.

Esto es lo preocupante: si la temperatura del helio se eleva, aunque sea poco, los cables de los imanes dejan de ser superconductores. Cuando eso sucede, la enorme cantidad de corriente eléctrica que los atraviesa se topa con una resistencia y responde calentándolos aún más, lo cual a su vez hace que el helio se caliente y el proceso se desboca: el helio líquido pasa a estado gaseoso, lo cual provoca el estallido de los recipientes que lo contienen. Cuando está en funcionamiento, los imanes del LHC están siempre a un minúsculo paso del desastre.

Entre los físicos, un suceso de pérdida de control como ese se conoce como un quench. El 19 de septiembre de 2008, una avería eléctrica aparentemente menor provocó un quench en un imán, y los problemas se extendieron con rapidez a los imanes cercanos. Lyn Evans, director del LHC en aquella época, recuerda que estaba en la oficina de personal, discutiendo sobre algo bastante banal, cuando lo llamaron a su móvil y le dijeron que acudiese inmediatamente. La cosa parecía grave. «Cuando llegué, no había visto tal carnicería ni siquiera en una pantalla de ordenador. Todo estaba rojo.»

Lograron localizar el origen del problema: una conexión defectuosa en una junta superconductora que provocó una descarga eléctrica que agujereó el recipiente con el helio. Finalmente, hubo que cambiar más de 50 imanes de los

1.232 que se emplean para curvar la trayectoria de los protones a lo largo del anillo del LHC. Las primeras informaciones provenientes del CERN definieron el accidente como una «fuga», pero «explosión» es una descripción más precisa. En pocos minutos, más de seis toneladas de helio líquido se vertieron en el túnel, y las tensiones arrancaron los imanes de sus fijaciones al suelo. Los procedimientos de seguridad exigen que se prohíba la entrada de cualquier persona al túnel del LHC mientras circulan los protones, pero, de hecho, en el momento del accidente el haz estaba desconectado. Por suerte, la zona afectada estaba vacía y nadie resultó herido.

REDOBLANDO ESFUERZOS

Al menos, nadie resultó físicamente herido. Mentalmente, los daños fueron más graves. Robert Aymar, un físico francés que era director general del CERN por aquel entonces, emitió un comunicado de prensa que decía: «Apenas unos días después del gran éxito que supuso la puesta en marcha del LHC el 10 de septiembre, no cabe duda de que, psicológicamente, este es un golpe duro». Tras años de intenso trabajo, a punto de ver por fin el LHC en funcionamiento, este inesperado revés resultaba desalentador.

Pero esta historia tiene un final feliz. Por grande que fuese el desánimo que provocó, la explosión del 19 de septiembre también hizo que la comunidad del CERN se comprometiese con el objetivo de devolverle la vida al LHC. Los ingenieros y los físicos se pusieron manos a la obra en la tarea de comprobar y mejorar cada pieza de la maquinaria para asegurarse de que podría soportar las extraordinarias energías que esperaba dominar. No se trataba únicamente de apretar unos cuantos tornillos sueltos: no solo había que reparar los equipos dañados, sino que había que someter todas y cada una de las piezas de la máquina a un estándar de calidad superior. Era una labor lenta y exigente. Pasó más de un año hasta que el acelerador estuvo de nuevo en condiciones de entrar

en funcionamiento.

El cargo oficial de Mike Lamont es coordinador de máquinas en el LHC, pero un fan de Star Trek lo describió una vez como «el míster Scott del LHC». Lleva más de veintitrés años en el CERN, y es el responsable de que el flujo de protones no se detenga ni siquiera ante obstáculos en apariencia insuperables. Por supuesto, los pequeños fallos técnicos se sucedían continuamente, pero, a medida que se acercaba la fecha en que el LHC entraría de nuevo en funcionamiento, era como si cada problemilla creciese hasta adquirir proporciones gigantescas. Durante las pruebas realizadas el 3 de noviembre de 2009, la temperatura de varios imanes empezó a subir debido a una avería eléctrica en uno de los generadores situados en la superficie. Lamont les explicó a los curiosos periodistas que habían determinado que el origen del problema había sido un pequeño pedazo de pan que había caído sobre una barra colectora. Al parecer, un pájaro había dejado caer un trocito de baguette desde el aire. Lamont y el resto de los ingenieros lo repararon rápidamente y la situación volvió a la normalidad, pero no sin que antes la noticia hubiese dejado perplejos a los periodistas. El *Telegraph* publicó una fotografía del detector CMS junto a otra de una paloma, acompañadas del texto siguiente: «El Gran Colisionador de Hadrones (izquierda) y su archienemigo (derecha)».

El 20 de noviembre de 2009, los protones volvieron a circular por el LHC por primera vez desde el accidente. Tres días más tarde, los haces se unieron para producir las primeras colisiones en la máquina. Y apenas siete días después de esto, las energías habían aumentado hasta el punto de que el LHC ya era el acelerador de mayor energía jamás construido.

La programación normal del LHC incluía una parada en pleno invierno para reducir gastos durante los meses en que la electricidad es más cara en Ginebra. Pero en 2009-2010 todo el mundo estaba impaciente, y el personal redobló sus esfuerzos para poner el acelerador a pleno rendimiento. Los primeros datos físicos (por contraposición con los de «puesta en marcha» que se utilizan durante las pruebas) se tomaron a principios de 2010. En marzo de ese año, el LHC

alcanzó su objetivo provisional en cuanto a energía (la mitad del objetivo final), y al hacerlo estableció un nuevo récord para colisiones de alta energía. El champán corrió de nuevo.

Con la perspectiva del tiempo, el accidente de septiembre de 2008 sirvió para que los físicos y los técnicos del LHC comprendiesen mucho mejor cómo funciona su máquina y, como consecuencia, las sesiones de recopilación de datos a partir de 2010 fueron básicamente una sucesión de historias de éxito. Puesto que, en la práctica, el LHC no entró en funcionamiento hasta ese año, a casi todos nos sorprendió que, en julio de 2012, los experimentos ya hubiesen recopilado y analizado suficientes datos para descubrir el Higgs. Es como si nos compráramos un coche caro, el coche se averiase prácticamente en ese mismo instante y tuviésemos que hacer frente durante una temporada a molestos problemas de mantenimiento, pero una vez que por fin consiguiéramos salir con él a la carretera y pisásemos el acelerador, su rendimiento nos dejase sin habla.

El Gran Colisionador de Hadrones es ciencia a la mayor de las escalas. El número de elementos que lo componen —tanto humanos como mecánicos— en ocasiones puede llegar a intimidar o a abrumar. En palabras del premio Nobel Jack Steinberger: «El LHC es un símbolo de lo difícil que resulta realizar cualquier progreso en la época en que vivimos. Menuda diferencia con los días en que era estudiante de doctorado, hace sesenta y cinco años, cuando, sin ayuda y en medio año, pude llevar a cabo un experimento que supuso un interesante avance». El LHC es la máquina más grande y más compleja que el ser humano ha construido jamás, y a veces resulta sorprendente constatar incluso que funciona.

Pero así es. Y de manera espectacular. Una y otra vez, los físicos con los que conversé cuando estaba escribiendo este libro me hablaron de la imponente magnitud del proyecto, pero también de cómo el CERN podía servir de modelo para la colaboración internacional a gran escala. El físico experimental Joe Incandela afirmó: «Lo que me maravilla es que tenemos gente de setenta países de todo el mundo trabajando conjuntamente. Palestinos e israelíes trabajando

modo con modo, científicos iraníes e iraquíes que trabajan juntos. No deberíamos ignorar colaboraciones como estas, que tienen el objetivo de hacer ciencia con mayúsculas. Joe Lykken, un físico teórico estadounidense que trabaja en el Fermilab, añadió con un toque de melancolía: «Si las Naciones Unidas fuesen capaces de funcionar como el CERN, el mundo sería un lugar mucho mejor».

Si el lector cree que la labor de buscar partículas como el bosón de Higgs, para cuya producción se requiere una enorme cantidad de energía, merece la pena, la ciencia a gran escala es la única vía posible. Con experimentos relativamente baratos y con limitados medios se puede llevar a cabo una gran cantidad de estupenda investigación, pero descubrir nuevas partículas con masa está en otra categoría. Hoy en día, el LHC es nuestra única opción, y su rendimiento es buena muestra del ingenio y la perseverancia humanos.

AÑOS DE PLANIFICACIÓN

El LHC es un prodigio de planificación y diseño. Los físicos del CERN llevaban un tiempo pensando en un colisionador de protones gigante, pero las primeras conversaciones «oficiales» sobre lo que acabaría siendo el LHC tuvieron lugar en unas jornadas de trabajo en Lausana (Suiza) en marzo de 1984. Los responsables del proyecto sabían que Estados Unidos estaba contemplando la idea de lo que acabaría siendo el Supercolisionador Superconductor, por lo que debían decidir si la construcción de un competidor europeo constituía un uso razonable de unos recursos escasos. (No sabían, por supuesto, que más adelante el SSC se cancelaría.) A diferencia del SSC, cuya construcción empezaría desde cero, el alcance del LHC estaría limitado por la necesidad de que encajase dentro del túnel del LEP, ya construido. En consecuencia, el objetivo en cuanto a energía se estableció en 14 TeV, apenas algo más de un tercio de los 40 TeV que pretendía alcanzar el SSC. Pero el LHC sería capaz de generar más colisiones por segundo, y era menos caro. Y había la posibilidad de que toda la física

interesante estuviese accesible a 14 TeV, lo que haría irrelevante la energía del SSC.

Buena parte del impulso al proyecto del LHC se debía al físico italiano Carlo Rubbia, un físico experimental influyente e impetuoso que había recibido el premio Nobel en 1984 por el descubrimiento de los bosones W y Z. Rubbia es una figura grandiosa, tan conocido por su enérgica personalidad como por sus logros científicos (que son considerables). Fue él quien, en 1981, convenció al CERN para que construyese el primer colisionador protón-antiprotón, un concepto que más adelante también adoptaría el Tevatrón del Fermilab. (Con el LHC hemos vuelto a los choques entre protones, ya que es demasiado difícil generar un número suficiente de antiprotones para alcanzar el número deseado de colisiones.)

Primero como presidente del Comité de Planificación a Largo Plazo del CERN, y más tarde como director general del laboratorio entre 1989 y 1993, Rubbia impulsó con determinación el LHC en un momento en que el LEP aún no se había terminado de construir y se pensaba que Estados Unidos seguiría adelante con el SSC. Europa tenía que hacer frente a sus propias dificultades presupuestarias, en particular Alemania, donde los costes de la unificación eran elevados. Rubbia logró finalmente convencer a los gobiernos europeos de que un colisionador de hadrones era el paso más lógico para el laboratorio, con independencia de lo que pudieran hacer otros países. No fue hasta 1991 cuando el consejo del CERN aprobó una resolución para estudiar oficialmente la propuesta del LHC, y hasta diciembre de 1994 (después de que el SSC hubiese sido cancelado) el proyecto no logró la aprobación definitiva. Lyn Evans fue nombrado director del LHC, y dio comienzo realmente la imponente tarea de hacer realidad la idea.

EL ARQUITECTO

En un proyecto de tantos años de duración, en el que participan tantas personas y países distintos, y con un número tan abrumador de subproyectos importantes, sería injusto que una sola persona acaparase casi todo el reconocimiento, restándole así importancia al papel de tantas otras. Sin embargo, si alguien puede presumir de haber construido el LHC, ese es Lyn Evans.

Evans da la impresión de ser un hombre modesto, con su pelo canoso y su aspecto distinguido pero informal. Nacido en una familia de mineros galeses, su primer amor fue la química. Disfrutaba especialmente fabricando explosivos, cosa que no es de extrañar en alguien que un día acabaría diseñando las colisiones entre partículas de mayor energía que los humanos hemos logrado jamás. En la universidad se pasó a la física, porque era «más interesante y más fácil». Cuando se aprobó el proyecto del LHC, el CERN necesitaba a alguien con la experiencia suficiente para tomar las riendas del proyecto, pero con la suficiente juventud y energía para llevarlo a buen puerto. A Evans se le encomendó la formidable tarea de extraer toda la física posible de una máquina de tamaño fijo, con un presupuesto limitado, y con una serie de retos tecnológicos únicos en la historia de la ciencia experimental. Fue Evans quien encontró la manera de modificar los esquemáticos planes originales del LHC para acabar con un diseño que fuese compatible con la realidad presupuestaria.

Durante el desarrollo de un proyecto de ingeniería de esta magnitud, era de esperar que apareciesen inesperados obstáculos en el camino. Aunque el túnel que acogería al LHC ya existía, cortesía del LEP, hubo que excavar nuevas galerías para los cuatro grandes experimentos que se dedicarían a medir los resultados de las colisiones. El experimento CMS está situado en la zona del anillo más alejada de la sede principal del CERN, junto al pueblo de Cessy, del lado francés de la frontera. Cuando los operarios se disponían a excavar un agujero para el nuevo experimento, se encontraron con algo inesperado: las ruinas de una villa romana del siglo IV. Se hallaron joyas y monedas provenientes de lo que ahora son Inglaterra, Francia e Italia, una noticia

fascinante para los arqueólogos, pero que supuso un retraso crítico para los físicos: la construcción se paralizó durante seis meses, mientras se examinaban las ruinas.

Pero la cosa no acabaría ahí, ni mucho menos. Resulta que la galería del CMS está situada bajo el lecho de un río subterráneo. La corriente de agua no afectaría al experimento, pero sí dificultaba el propio proceso de excavación. Al equipo de construcción se le ocurrió una solución muy física: introdujeron en el suelo varias tuberías y las rellenaron de nitrógeno líquido, lo que hizo que el agua se congelase y les permitió realizar las excavaciones en terreno sólido. «Fue muy emocionante», reconoció Evans.

Como los muchos otros físicos y como el personal del CERN que trabajaba en el LHC, Evans perseveró. Aparte de los problemas técnicos, los caprichosos gobiernos amenazaban constantemente con cortar su aportación al CERN. Al más alto nivel, la física de partículas requiere tanta diplomacia e inteligencia política como conocimientos técnicos. En 1997 se dio un gran paso adelante cuando Estados Unidos aceptó contribuir al proyecto con dos mil millones de dólares. Todos los estados que forman parte oficialmente del CERN son europeos: Alemania, Austria, Bélgica, Bulgaria, República Checa, Dinamarca, Eslovaquia, España, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Italia, Noruega, Países Bajos, Polonia, Portugal, Reino Unido, Suecia y Suiza. Estados Unidos (junto con la India, Japón, Rusia y Turquía) es un Estado «observador», que puede participar en las operaciones físicas y asistir a las reuniones del consejo del CERN, pero al que no se le permite participar oficialmente en las decisiones sobre las políticas a seguir. Muchos otros países han alcanzado acuerdos por los cuales sus científicos pueden trabajar en el CERN. Pero Estados Unidos es el peso pesado, y obtener garantías de su compromiso con el éxito del LHC fue muy importante para el proyecto, como también lo fueron los compromisos previos de Japón y Rusia. Al poco tiempo, más de mil físicos estadounidenses estaban trabajando en el LHC.

Evans tiene de natural un estilo relajado, y se encuentra más a gusto

toqueteando los equipos con sus propias manos que exigiéndoles a sus subordinados que guarden un detallado registro de los avances que se produzcan. Aunque la construcción del LHC progresó según el calendario previsto, las pequeñas desviaciones presupuestarias se fueron acumulando gradualmente. La situación se destapó en 2001, cuando se supo que el presupuesto había aumentado en alrededor de un 20 por ciento. En contra del criterio de Evans, el director general, Luciano Maiani, hizo públicos los sobrecostes en una reunión abierta del consejo del CERN, solicitando directamente que los estados miembros hiciesen una aportación adicional para cubrirlos.

Eso no les hizo ninguna gracia. Robert Aymar, que sucedería a Maiani como director general en 2004, recibió instrucciones del consejo del CERN para que llevase a cabo una minuciosa auditoría de la gestión de la emblemática máquina. Hubo quien se preguntó si Evans era la persona adecuada para la tarea burocrática, o si hacía falta una mano más firme. Pero Aymar era consciente de que nadie entendía el LHC como Evans, y sabía que eso pesaba mucho más que su carácter disoluto, así que continuó como director del proyecto. Más tarde, Evans se referiría a esta época como el peor momento de su trabajo en el LHC. «Me frieron a interrogatorios —dijo—. Fue el peor año de todos.»

Reflexionando sobre el accidente del 19 de septiembre, una vez que la máquina se puso en funcionamiento, Evans comentó: «Fue en el último circuito del último sector. Una putada. Por suerte, ya había superado otros problemas complicados en el pasado».

ACELERANDO PARTÍCULAS

En el juego del tetherball, un extremo de la cuerda se engancha a lo alto de un poste, y del otro cuelga un balón de voleibol. Los dos combatientes se sitúan a ambos lados del poste, y golpean con fuerza el balón intentando que la cuerda se enrolle alrededor del palo. Imagine ahora que solo hay un jugador, y que la

cuerda puede dar vueltas libremente alrededor del extremo superior del poste, en lugar de enrollarse. En cada vuelta, el jugador empuja el balón en la misma dirección, haciendo que alcance una velocidad cada vez mayor.

En pocas palabras, esa es la idea básica de un acelerador de partículas como el LHC. El lugar del balón lo ocupa un puñado de protones; el de la cuerda que hace que la pelota se mueva en círculos, unos intensos campos magnéticos que curvan la trayectoria de los protones a lo largo del anillo; y el del jugador que golpea la pelota, un campo eléctrico que impulsa los electrones para que su velocidad aumente con cada vuelta.

Comparado con los objetos que nos rodean, un protón es diminuto. No es posible cogerlo y lanzarlo o golpearlo con la mano cuando pasa por delante. Para acelerar los protones en el LHC, un generador de voltaje produce un campo eléctrico que varía rápidamente y alterna su dirección cuando pasan los protones, alrededor de 400 millones de veces por segundo. El ritmo al que cambia de dirección está sincronizado con precisión, de manera que cada protón, al atravesar la cavidad, siempre ve un campo eléctrico que apunta en la misma dirección, lo que hace que su velocidad aumente rápidamente. El impulso solo tiene lugar en un punto del anillo; la mayoría de la energía a lo largo de los veintisiete kilómetros de recorrido se emplea en hacer que los protones se muevan en la dirección apropiada, no en acelerarlos.

Cuando el LHC funciona a pleno rendimiento, por él circulan alrededor de 500 billones de protones en dos haces, uno que se mueve en el sentido de las agujas del reloj y otro en sentido contrario. (Las cifras son aproximadas, porque normalmente el rendimiento de la máquina va mejorando con el tiempo.) Son muchísimos protones, pero no dejan de ser un número muy pequeño en comparación con los que contiene cualquier objeto cotidiano. Todos los protones del LHC provienen de una única bombona de hidrógeno sin nada de particular, que tiene la apariencia de un extintor. Una molécula de hidrógeno tiene dos átomos, cada uno de ellos compuesto por un protón y un electrón. Se extrae de la bombona una pequeña cantidad de hidrógeno, se somete a una descarga eléctrica

para arrancar los electrones, y los protones continúan su camino. Cuando llegó al CERN, Lyn Evans, que tenía formación en fusión pero no en física de partículas, empezó trabajando precisamente en este proceso. La bombona contiene aproximadamente 1027 átomos de hidrógeno, suficientes para mantener el LHC en funcionamiento durante mil millones de años. Los protones no son un recurso escaso.

Los protones no se inyectan en el LHC de manera continua, sino que este «se rellena» aproximadamente cada diez horas (o cuando el haz se degrada por cualquier motivo). Los protones se trasladan con el máximo cuidado a través de una serie de aceleradores preliminares, antes de llegar al anillo principal. No hay margen para el error. Los protones que componen los dos haces en circulación no se distribuyen de manera uniforme: se agrupan en miles de «paquetes», cada uno de los cuales contiene más de 100.000 millones de protones. Estos cúmulos tienen una longitud de unos dos centímetros y medio, la distancia entre ellos es de 7 metros y tienen forma de aguja muy fina. Mientras recorre el anillo, el grosor del haz es aproximadamente de 1 milímetro, y se concentra aún más, hasta las 25 micras de diámetro, cuando el haz entra en uno de los detectores donde se producen las colisiones. Todos los protones tienen la misma carga eléctrica positiva, por lo que tienden naturalmente a separarse los unos de los otros, y conseguir que el haz se mantenga unido no es tarea fácil.

Aparte de la energía de las partículas que colisionan, la otra magnitud importante en un acelerador es la luminosidad, que permite medir cuántas partículas intervienen. El lector podría pensar que bastaría con contar el número de partículas que dan vueltas al anillo, pero lo que importa en realidad es el número de colisiones, y un elevado número de partículas solo da lugar a un elevado número de colisiones si el haz está altamente concentrado. A lo largo de 2010, la prioridad era poner la máquina a prueba y comprobar que todo funcionaba correctamente, por lo que la luminosidad no era muy elevada. En 2011, casi todos los problemillas se habían solucionado, y el número de colisiones se multiplicó casi por cien respecto al año anterior. En 2012, los éxitos

continuaron, y durante la primera mitad del año generaron más colisiones que en todo 2011. Esa enorme cantidad de datos es la que permitió que el descubrimiento del Higgs se produjese antes de lo esperado.

VELOCIDAD Y ENERGÍA

Los protones del LHC tienen mucha energía porque se mueven muy deprisa, casi a la velocidad de la luz. Cualquier objeto con masa, ya sea una persona, un coche o un protón, posee cierta cantidad de energía cuando está en reposo, según la fórmula de Einstein, $E = mc^2$, y una energía «cinética» adicional que depende de la velocidad a la que se mueve. En nuestro mundo cotidiano, la energía de movimiento es muchísimo menor que la que el objeto posee incluso cuando está en reposo, sencillamente porque las velocidades habituales son muchísimo más bajas que la de la luz. El avión más rápido del mundo es una aeronave experimental de la NASA llamada X-43, que alcanza velocidades de más de 11.000 kilómetros por hora. A esa velocidad, la energía del avión debida a su movimiento no supone más que una diez mil millonésima parte de su energía en reposo.

Los protones del LHC se mueven bastante más rápido que el X-43. Durante su primer período de actividad, entre 2009 y 2011, lo hacían a un 99,999996 por ciento de la velocidad de la luz, es decir, a 1.079.252.806 kilómetros por hora. A tales velocidades, la energía debida al movimiento es mucho mayor que la energía en reposo. Esta, en el caso de un protón, es prácticamente de un 1 GeV. Durante ese primer período, cada protón tenía una energía de 3.500 GeV, o 3,5 TeV, de manera que, cuando se producía una colisión entre dos de ellos, la energía total era de 7 TeV. En 2012, la energía total de los protones era de 8 TeV, y el objetivo final es alcanzar los 14 TeV. El Tevatrón del Fermilab, a su vez, nunca superó los 2 TeV de energía total.

A velocidades tan próximas a la de la luz, la teoría de la relatividad cobra una

importancia fundamental. La relatividad nos enseña que, a velocidades altas, el espacio y el tiempo cambian: el tiempo se ralentiza, comparado con el que marcan los relojes en reposo, y las longitudes se contraen a lo largo de la dirección del movimiento. Como consecuencia, a uno de esos protones de alta energía los veintisiete kilómetros alrededor del anillo le parecerían mucho más cortos (si los protones se fijaran en esas cosas). Para un protón a 4 TeV, una vuelta al anillo equivaldría a una distancia de algo más de 6 metros. Cuando alcancen los 7 TeV, dicha distancia no llegará a los 4 metros.

¿Cuánta energía es un TeV? No tanta, más o menos la que tiene un mosquito cuando vuela, algo que ni siquiera notaría si chocase contra usted. Lo asombroso no es que 4 TeV (o los que sean) sea tanta energía, sino que toda ella está contenida en un solo protón. Y recuerde que hay 500 billones de protones moviéndose a toda velocidad en el interior del LHC. Si pensamos en el haz en conjunto, la energía sí que es importante, aproximadamente la misma con la que nos embestiría una locomotora. No tendría ninguna gracia interponerse en su camino.

¿O sí? Aunque los protones del LHC poseen una considerable capacidad de impacto, están colimados en un haz muy fino. Es posible que la mayoría de ellos simplemente le atravesasen, ¿no?

Sí y no. Nadie ha expuesto nunca ninguna parte de su cuerpo a un haz en el LHC, ni tendría cómo hacerlo: está firmemente sellado en una tubería al vacío, fuera del alcance de los humanos entrometidos. Pero, en 1978, un desdichado científico soviético llamado Anatoli Bugorski se las apañó para recibir el impacto en pleno rostro de un haz de partículas de alta energía. (Las normas de seguridad del Sincrotrón U-70 de Protvino, en Rusia, eran algo más laxas que las del CERN.) Dicho haz estaba compuesto por protones de 76 GeV, energía mucho menor que la que tienen los protones del LHC, pero que no deja de ser considerable. Bugorski no murió al instante; de hecho, aún sigue vivo. Un tiempo después, confesó haber visto un destello de luz «más brillante que mil soles juntos», pero no haber sentido dolor alguno. La radiación le produjo una

importante cicatriz, le provocó pérdida de audición en el oído izquierdo y la parálisis de la mitad izquierda de la cara. Aún hoy, de vez en cuando sigue sufriendo ataques. Pero sobrevivió sin daños mentales dignos de mención, terminó su doctorado y siguió trabajando en el complejo del acelerador durante años. No obstante, los expertos recomiendan evitar la exposición a los haces de protones de alta energía.

La razón por la que la cabeza de Bugorski no saltó en pedazos es que muchos de los protones sencillamente la atravesaron. Pero en el LHC a menudo es necesario «deshacerse» de la carga, lo que implica tener que poner en algún sitio toda la energía del haz. (Si pudiésemos ralentizar los protones, la energía se disiparía sin ningún peligro, pero eso no resulta práctico.) Otra manera de hacerse una idea de la magnitud de la energía total de los protones es pensar que equivale a unos 80 kilos de TNT. Y todo eso debe acabar en algún lugar, aproximadamente cada diez horas, al final de cada relleno.

Los experimentos han demostrado que el pleno impacto del haz del LHC bastaría para fundir una tonelada de cobre. Desde luego, no sería nada bueno que el haz se desviase repentinamente y sin control hacia el equipo experimental cuidadosamente calibrado. Lo que se hace es alejar el haz ya descartado de su recorrido normal mediante unos imanes especiales, tras lo cual recorre varios cientos de metros antes de terminar incidiendo sobre un bloque de especial grafito «de descarga». Este material es particularmente efectivo a la hora de difundir la energía sin fundirse, a pesar de que alcanza temperaturas superiores a los 750 grados centígrafos. En total, son unas diez toneladas de grafito, cubiertas por un revestimiento de mil toneladas de acero y hormigón. Se deja enfriar durante unas cuantas horas, y ya está preparado para recibir el nuevo haz descartado.

PODEROSOS IMANES

Nos imaginamos el LHC como un anillo circular gigante de veintisiete kilómetros de longitud, pero lo cierto es que se asemeja más a un octágono curvo, en el que el anillo se divide en octantes. Hay ocho arcos, cada uno de ellos de casi dos kilómetros y medio de longitud, conectados por secciones rectas de aproximadamente 500 metros de extensión. Si visitásemos uno de estos arcos del túnel del LHC, lo que nos encontraríamos sería una sucesión de grandes tuberías azules que se extienden en ambas direcciones: son los «dipolos magnéticos» que guían a los protones en su recorrido por el tubo que contiene el haz. En cada uno de los arcos hay 154 de estas tuberías, cada una de ellas de quince metros de longitud y más de treinta toneladas de peso. El interior de la tubería lo ocupa en su mayor parte un imán superconductor ultrafrío y en pleno centro hay dos finos tubos para los haces, por los que se desplazan los protones (unos en el sentido de las agujas del reloj y otros en sentido contrario).

Si una partícula cargada, como un protón, se encuentra estacionaria en un campo magnético, no experimenta ninguna fuerza, y puede seguir felizmente en reposo. Pero cuando una partícula cargada en movimiento atraviesa un campo magnético, sufre una desviación respecto a la trayectoria recta. (Las partículas neutras lo atravesarían sin verse afectadas.) Recuerde que el haz del LHC tiene la energía de un tren en movimiento: son necesarios imanes tan extraordinariamente potentes simplemente porque no es fácil conseguir que los protones tracen un giro pronunciado.

Los imanes del LHC tienen la máxima potencia que somos capaces de alcanzar para hacer que los protones circulen por un túnel de dimensiones fijas con la máxima energía posible. La Tierra posee un campo magnético, que permite que una brújula pueda distinguir el norte del sur. El campo en el interior de uno de los dipolos del LHC es aproximadamente 100.000 veces más intenso que el terrestre. Tanto que, de hecho, los materiales ordinarios no son capaces de soportarlo y es necesario emplear superconductores. Los imanes contienen casi ocho mil kilómetros de cable enrollado, fabricado con un compuesto superconductor de niobio y titanio, enfriado a temperaturas ultrabajas con 120

toneladas de helio líquido. El interior del LHC está, de hecho, más frío que el espacio exterior: la temperatura de los imanes es inferior a la del fondo de radiación cósmica residual proveniente del big bang.

La temperatura no es el único criterio por el que el LHC sale ganando al compararlo con el espacio exterior. En el interior de los tubos de los haces, a través de los cuales se desplazan los protones, el vacío debe ser lo más alto posible. Si estuviesen llenos de aire, los protones chocarían continuamente con las moléculas de aire, lo que acabaría con el haz. Por este motivo, los tubos se mantienen en el vacío más estricto, tanto que la presión en su interior es aproximadamente igual a la que existe sobre la superficie de la Luna.

Antes de que la máquina se pusiese en funcionamiento por primera vez, al equipo del LHC le preocupaba no saber si el vacío que habían alcanzado sería suficiente. Cuando se puso en marcha el Tevatrón del Fermilab, en 1983, los primeros intentos de hacer circular protones enseguida fracasaron. Más tarde se descubrió que la causa había sido un pequeño pedazo de tela que estaba taponando el tubo. Pero ¿hay alguna manera fácil de revisar veintisiete kilómetros de acelerador? Los tubos del haz tienen poco más de dos centímetros de diámetro, lo que dio lugar a una idea ingeniosa: los técnicos fabricaron con un policarbonato resistente a los golpes una especie de «pelota de ping-pong», introdujeron en su interior un radiotransmisor y la lanzaron rodando por el tubo. Si la bola se quedaba atascada, los técnicos podía rastrear la transmisión y determinar dónde se había detenido. Era una gran idea, y seguro que más de uno se llevó una decepción cuando las pelotas completaron su recorrido sin problemas, confirmando así el satisfactorio estado de salud de los tubos de los haces.

Los imanes del LHC son las partes más grandes y voluminosas de toda la maquinaria, y representan un extraordinario prodigio de innovación tecnológica y de colaboración internacional. Tal nivel de precisión tiene un precio. Es difícil estimar con exactitud el coste del LHC, porque buena parte del gasto se dedica al mantenimiento del laboratorio en general, pero no es descabellado afirmar que el

presupuesto total ronda los 9.000 millones de dólares. En palabras del físico Gian Giudice: «Si se expresa en euros por kilogramo, el coste de los dipolos del LHC —la parte más cara del acelerador— es similar al del chocolate suizo. Si estuviese hecho de chocolate, el LHC habría costado más o menos lo mismo».

Puede parecer que el chocolate no es tan caro. Al fin y al cabo, nos lo comemos. Pero normalmente no son veintisiete kilómetros del de mejor calidad. Al final todo suma.

CEDIENDO EL RELEVO

Lyn Evans dejó el CERN oficialmente en 2010, una vez que la máquina se puso en funcionamiento con éxito. Llegó al laboratorio en 1969, lo que supone más de cuatro décadas de experiencia, trabajando para diez directores generales distintos. En 1981, Evans, Carlo Rubbia y Sergio Ciddolin (un físico italiano aficionado a ilustrar los cuadernos de laboratorio con dibujos del estilo de los de Leonardo da Vinci) eran las únicas tres personas presentes en la sala de control a las 4.15 de la madrugada, cuando pusieron en marcha el Supersincrotrón de Protones tras las mejoras y fueron testigos de la primera colisión protón-antiprotón en el interior de un acelerador de partículas.

Un escenario bien diferente del que tuvo lugar el 10 de septiembre de 2008, cuando la inauguración del LHC se convirtió en un acontecimiento internacional presenciado por cientos de personas en directo y por otras miles desde todos los rincones del mundo a través de internet. Ese día, Evans ofició de maestro de ceremonias en una sala de control repleta de periodistas, científicos famosos y autoridades. Para mantener el suspense, no se limitaron a hacer que los protones recorrieran de una vez todo el anillo, sino que fueron abriendo los ocho sectores uno por uno. Después de que los siete primeros se hubiesen transitado sin problemas, Evans inició la cuenta atrás mientras hacían que los protones estuviesen en disposición de completar el círculo. En el momento previsto, dos

puntos parpadearon en una gris pantalla de ordenador, lo que indicó que el haz había logrado partir y llegar al mismo punto. La sala estalló en aplausos y dio comienzo una nueva era de la física.

Los físicos no suelen jubilarse en el sentido habitual del término, y para Evans la nueva fase de su vida supondría unirse al experimento CMS en el LHC y contribuir a la planificación de la siguiente generación de aceleradores. Después de los seminarios en los que se anunció el descubrimiento del Higgs, hizo una pausa para reflexionar sobre lo que había sentido: «El otro día fui a la fiesta de verano del CMS y había unas quinientas personas. Cuando vi a todos esos jóvenes, de pronto fui consciente del peso que había llevado a costas. Quiero decir que ¿cuánta gente depende de que la máquina funcione correctamente?».

Ahora que la máquina funciona sin sobresaltos, el CERN confía en que lo siga haciendo durante décadas. Tardó más de un año en recuperarse del revés de septiembre de 2008, pero desde entonces su rendimiento ha sido espléndido. El hecho de que funcionase a 7 TeV a lo largo de 2010 y 2011, y a 8 TeV en 2012, hizo posible el descubrimiento del bosón de Higgs, o de algo que se le parece mucho. Aun así, el objetivo final es alcanzar los 14 TeV, y para conseguirlo será necesario su cierre durante dos años para mejorar y probar los equipos. En un principio, estaba previsto que dicho cierre se produjese a finales de 2012, pero tras el descubrimiento el consejo del CERN decidió que siguiese funcionando a 8 TeV durante unos cuantos meses más. Es una reacción natural: cuando te regalan un juguete, lo que quieres es empezar a jugar con él cuanto antes.

Hacia la sabiduría a base de choques

Donde aprenderemos cómo descubrir nuevas partículas observando lo que sucede cuando otras partículas chocan entre sí a velocidades enormes.

De niño me fascinaba todo tipo de ciencia, pero solo dos asuntos me llamaban realmente la atención: la física teórica y los dinosaurios. (A los doce años, no conocía la palabra «paleontología».) Coqueteé con otras ciencias, pero esas relaciones nunca llegaron demasiado lejos. Me lo pasaba bien con mi juego de química, sobre todo porque podía quemar cosas, pero nunca me emocionó demasiado la idea de crear nuevos compuestos en condiciones cuidadosamente controladas.

¡Pero los dinosaurios...! Eso sí que fue un verdadero romance. Mi abuelo nos solía llevar a mi hermano y a mí al Museo Estatal de New Jersey, en Trenton, donde pasábamos de largo los aburridos instrumentos y las exposiciones de historia para contemplar boquiabiertos los esqueletos que se erguían amenazantes sobre nosotros. Nunca me planteé seriamente la posibilidad hacer carrera en paleontología, pero, aunque en público no lo reconozcan, todos los científicos a los que conozco están de acuerdo conmigo en que los dinosaurios son lo más de lo más.

Por eso me hizo tanta ilusión, siendo ya adulto y profesor en la Universidad de Chicago, tener la oportunidad de participar en una expedición de búsqueda de dinosaurios. La mayoría de las excursiones se las apañan perfectamente sin físicos, pero esta estaba organizada por Project Exploration, una organización sin ánimo de lucro dedicada a hacer llegar la ciencia a niños y personas

pertenecientes a minorías con muy baja representación. Era un acontecimiento especial para amigos de la organización y a mí me llevaron para ofrecer otro tipo de divulgación científica. A mí todo me parecía bien, como si me hubiesen dicho que me llevaban para fregar platos, lo único que me importaba era que iba a excavar huesos de dinosaurios.

Y bien que excavamos, en una región de la formación geológica Morrison, cerca de Shell, en Wyoming (con una población aproximada de 50 personas). La formación Morrison está repleta de fósiles del Jurásico, y nos pasábamos las calurosas horas diurnas desenterrando alegremente especímenes de *Camarasaurus*, *Triceratops* y *Stegosaurus*. Puede que «excavar» dé una idea exagerada de los logros del equipo, compuesto en su gran mayoría por aficionados: sobre todo hicimos progresos en sitios que después se cubrirían para que otra expedición los terminase.

Aprendí mucho de esa experiencia. Sobre todo que, como trabajo, la física teórica es mucho más cómoda que la paleontología. No obstante, también encontré respuesta a una pregunta que llevaba años asaltándome: ¿cómo se diferencia un trozo de hueso fosilizado de la matriz de roca que lo rodea? Durante millones de años, lo que empezó siendo un esqueleto va absorbiendo minerales de la roca próxima a él hasta que llega un momento en que es más roca que hueso. ¿Cómo se distingue uno de la otra?

La respuesta es: con mucho cuidado. Hay trucos, por supuesto, que un paleontólogo experto habrá ido refinando a lo largo de su carrera: sutiles gradaciones de color y textura que escapan a los sentidos de los no iniciados. Si llevamos a un grupo de aficionados a un lugar donde hay fósiles de dinosaurio, con mucha diferencia la pregunta más repetida será: «¿Esto es un hueso?». Pero hay una respuesta correcta, y los expertos (casi) siempre serán capaces de proporcionárnosla.

Aunque la experiencia de desenterrar dinosaurios no tiene absolutamente nada que ver con el día a día de un físico teórico, las semejanzas con la física de partículas experimental saltan a la vista. De manera informal, decimos que

«hemos visto un bosón de Higgs» en el Gran Colisionador de Hadrones, pero lo cierto es que no es tan sencillo. Nunca vemos bosones de Higgs, ni esperamos hacerlo, igual que no esperamos ver dinosaurios recorriendo las calles. La vida media del Higgs es muy breve, apenas una diez mil millonésima de billonésima de segundo, demasiado corta como para poder captarlo directamente, ni siquiera con los prodigios tecnológicos que son los experimentos del LHC. (Un quark bottom, cuya vida media es de una billonésima de segundo, está en el límite de lo discernible; la vida media del bosón de Higgs es una diez mil millonésima parte de la del quark.)

Lo que esperamos encontrar son evidencias del bosón de Higgs, en forma de otras partículas que se crean cuando este se desintegra. Fósiles, si lo prefiere.

En el capítulo anterior he hablado sobre el acelerador del LHC, que hace que cientos de miles de millones de protones den vueltas alrededor de un túnel subterráneo en las inmediaciones de Ginebra. En este capítulo veremos los experimentos: los enormes detectores situados en determinadas ubicaciones a lo largo del anillo, donde se producen las colisiones de protones en ráfagas de interacciones. En los datos de un determinado evento es probable que nos encontremos dos chorros de partículas sometidas a la interacción nuclear fuerte, así como un par muón-antimuón de alta energía. ¿Proviene todo eso de la desintegración de un Higgs, o de alguna otra cosa? La labor de identificar estos fósiles correctamente es una combinación de ciencia, tecnología y magia negra que constituye el núcleo de la búsqueda del Higgs.

IDENTIFICAR PARTÍCULAS

La física de partículas es una historia de detectives. Cuando llegan a la escena de un crimen, la mayoría de los detectives no tienen la suerte de encontrar una nítida grabación del culpable con las manos en la masa, o el inapelable testimonio de algún testigo ocular o una confesión firmada. Lo más probable es

que descubra algunas pistas confusas: un fragmento de huella dactilar por aquí, una minúscula muestra de ADN por allá. Lo difícil de su trabajo consiste en encajar todas esas pistas para reconstruir la historia del crimen.

De la misma manera, cuando los físicos experimentales de partículas analizan los resultados de un colisionador, no esperan que junto a una partícula aparezca un cartelito que diga: «¡Soy el bosón de Higgs!». El Higgs se desintegrará rápidamente en otras partículas, así que debemos tener una buena idea de qué partículas podemos esperar encontrar (de eso se encargan los teóricos). Entonces, hacemos chocar los protones entre sí y observamos cuál es el resultado. La mayor parte del volumen en el interior de un detector de partículas la ocupa el material en el que las partículas dejan trazas reveladoras al atravesarlo, el equivalente en la física de partículas de un rastro de huellas embarradas en la escena del crimen. Evidentemente, no todas las huellas tienen barro: partículas como los neutrinos, que no interactúan ni a través del electromagnetismo ni mediante la fuerza nuclear fuerte, dejan muy poco rastro, y tenemos que aguzar el ingenio para detectarlos.

Por desgracia, las trazas que sí somos capaces de observar tampoco vienen con etiquetas como: «Soy un muón y me muevo al 0,958 por ciento de la velocidad de la luz». Tenemos que deducir qué partículas surgieron de la colisión, y lo que eso implica para los procesos que hicieron que esta tuviese lugar. Necesitamos saber si este muón se produjo en la desintegración del Higgs, de un bosón Z, o de algún otro de entre el grupo de sospechosos. Y las partículas no van a confesar.

La buena noticia es que el número total de partículas del Modelo Estándar es relativamente manejable, por lo que los sospechosos no son tantos. Somos como un sheriff de pueblo más que como un detective en Manhattan. Tenemos seis quarks, seis leptones y un puñado de bosones: fotones, gluones, bosones W, Z y el propio Higgs. (Los gravitones no se producen prácticamente nunca, ya que la gravedad es extremadamente débil.) Si somos capaces de determinar la masa, la carga y si la partícula es sensible o no a la interacción nuclear fuerte,

básicamente ya la habremos identificado unívocamente. Así que en eso consiste la tarea del experimentalista: seguir el rastro, con la mayor precisión posible, a las partículas que surgen tras una colisión y determinar sus masas, cargas e interacciones. Esto nos permite reproducir el proceso fundamental que genera toda la excitación.

Es bastante fácil dilucidar si una partícula siente las interacciones fuertes, por la feliz razón de que dichas interacciones son verdaderamente fuertes. Las trazas que los quarks y los gluones dejan en un detector son completamente distintas de las de los leptones y los fotones. Enseguida se ven confinados en el interior de diversos tipos de hadrones, ya sean combinaciones de tres quarks (llamadas «bariones») o pares de un quark y un antiquark (conocidos como «mesones»). Estos hadrones tienen tendencia a chocar con los núcleos atómicos, lo que permite distinguirlos fácilmente. De hecho, cuando se crea un solo quark o gluón de alta energía, las interacciones fuertes normalmente hacen que se fragmente en todo un chorro de hadrones, que se conoce como «jet». Lo cual facilita mucho la labor de dilucidar si se ha producido un quark o un gluón, pero al mismo tiempo complica la de medir sus propiedades de manera precisa.

Del mismo modo, resulta bastante sencillo determinar la carga eléctrica de una partícula, gracias a la magia de los campos magnéticos. De la misma manera que el túnel del LHC está repleto de potentes imanes que dirigen los protones a lo largo del tubo circular por el que circulan los haces, los detectores del LHC están inundados por campos magnéticos que impulsan a las diversas partículas en distintas direcciones, lo que nos ayuda a identificarlas. Si una partícula en movimiento es desviada en una dirección, tiene carga positiva; si se desvía en la dirección opuesta, su carga es negativa. Y si continúa en línea recta, significa que es neutra.

EXPERIMENTOS A LO LARGO DEL ANILLO

Cuando Carl Anderson descubrió el positrón, allá por los años treinta, su cámara de niebla medía algo menos de metro y medio de extremo a extremo, y pesaba dos toneladas. Los experimentos del LHC son un poquito más grandes. Los dos más importantes, los mastodontes multiusos que se dedican a buscar el Higgs, son el ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS: Un Aparato Toroidal del LHC) y el CMS (Compact Muon Solenoid: Solenoide Compacto de Muones). Están situados en extremos opuestos del anillo: el ATLAS se encuentra junto a la sede principal del CERN, mientras que el CMS está al otro lado de la frontera, en Francia. El término «compacto» es relativo, desde luego: el CMS mide algo más de 20 metros y pesa unas 13.800 toneladas. El ATLAS es más voluminoso, pero también más ligero: 43 metros de largo y 7.700 toneladas de peso. Esas son las magnitudes que hay que manejar para poder penetrar hasta donde esperamos que esté el Higgs.

El LHC alberga otros cinco experimentos: dos de tamaño medio, ALICE y LHCb, y tres pequeños, TOTEM, LHCf y MoEDAL. LHCb está centrado en el estudio de la desintegración de los quarks bottom, que son útiles para realizar mediciones de precisión. ALICE (A Large Ion Collider Experiment: Un Gran Experimento Colisionador de Iones) se construyó para estudiar las colisiones de núcleos pesados, en lugar de protones, y para recrear el plasma de quarks y gluones que se extendía por todo el universo en los momentos posteriores al big bang. Esa es la razón por la que se llama Gran Colisionador de «Hadrones», y no Gran Colisionador de «Protones». Durante un mes al año, el LHC acelera y genera colisiones con iones de plomo, en lugar de protones. TOTEM (TOTal Elastic and diffractive cross-section Measurement: Medición de la Sección Eficaz Total por Dispersión Elástica y Difractiva), situado cerca del CMS, estudia la estructura interna de los protones y toma medidas de precisión de la probabilidad de que los protones interactúen entre sí. LHCf (la «f» significa *forward*, «adelante») utiliza las salpicaduras de las colisiones para estudiar las condiciones en las que los rayos cósmicos se propagan a través de la atmósfera. Está ubicado cerca del ATLAS y es mucho más pequeño que el resto de los

experimentos: dos detectores, cada uno de menos un metro de diámetro. MoEDAL (Monopole and Exotics Detector At the LHC) lleva a cabo búsquedas muy especializadas de partículas muy poco habituales.

Son los dos experimentos grandes, el ATLAS y el CMS, los que han liderado la búsqueda del bosón de Higgs. A diferencia de los más pequeños, diseñados para fines muy específicos, estos dos detectores se construyeron simplemente para observar las colisiones entre protones y para tener la mayor capacidad posible de determinar lo que resulta de ellas. Hicieron frente a los desafíos de diseño de diversas maneras, pero sus capacidades han acabado siendo comparables. Ni que decir tiene que disponer de dos experimentos es infinitamente preferible a contar con uno solo: cualquier descubrimiento espectacular y sorprendente que se produzca en alguno de los dos detectores no se tomará en serio hasta que el otro lo confirme.

Cuesta hacerse una idea de la enormidad de estas máquinas sin visitarlas en persona, algo que yo pude hacer cuando aún estaban en construcción. Una persona es tan pequeña en comparación con el CMS o el ATLAS que uno normalmente no las ve en las fotografías a menos que alguien se las señale. Al estar junto al detector, no solo llama la atención su tamaño, sino también su complejidad. Todas las piezas son importantes y, teniendo en cuenta la naturaleza internacional de las colaboraciones, es muy probable que dos piezas contiguas hayan sido fabricadas en laboratorios de extremos opuestos del mundo.

Aunque puede que el CMS no sea «compacto» en el sentido de «pequeño», sin duda lo es en el de que todos sus componentes están densamente apilados. Se quedó con su ubicación actual, menos deseable y a una buena tirada en coche desde los edificios del CERN, porque los estudios geológicos revelaron que el mayor tamaño del ATLAS hacía que solo tuviese cabida más cerca del CERN. El CMS es un amasijo extremadamente denso de metal, cristal y cable. Los imanes principales, los más potentes jamás construidos dentro de su categoría, no podían medir más de siete metros de diámetro, por un motivo bien prosaico: cualquier

cosa más grande no habría cabido en el camión que debía atravesar las calles de Cessy, el pueblecito francés donde está situado el experimento. (La página de Cessy en *Wikipedia*, escrita claramente por físicos que trabajan en el CERN, recomienda comer en determinada pizzería local, pero avisa de que «el servicio se lo toma con calma, por lo que no conviene ir allí si uno tiene prisa».) Las restricciones presupuestarias, junto con las logísticas, fueron cruciales para su diseño y construcción: el latón de las gigantescas tapas cilíndricas en cada extremo del detector procede del reciclaje de proyectiles de artillería rusos. Una parte fundamental del detector la constituyen un conjunto de 78.000 cristales de tungstato de plomo, producidos en Rusia y en China a lo largo de un período de diez años, pues cada cristal tarda dos días en crearse de manera artificial.

No obstante, el que suele aparecer habitualmente en las fotografías más difundidas del LHC es el ATLAS. La razón es sencilla: parece una nave alienígena. La característica distintiva del detector son los ocho imanes toroidales gigantes que le dan nombre. Puede que al ver un imán del ATLAS no distingamos el «toro», que es la forma de una rosquilla, porque los imanes son tuberías aproximadamente rectangulares con las esquinas redondeadas. Pero los físicos han aprendido de los topólogos, los matemáticos que estudian las características generales y no las formas específicas, y para ellos un «toro» es cualquier cilindro que se cierra sobre sí mismo. Los toroides del ATLAS producen un intenso campo magnético en una zona gigantesca, lo cual es útil para seguirles el rastro a los muones de alta energía que se crean en las regiones más internas del detector. Cuando los imanes se ponen en funcionamiento, la cantidad total de energía que se acumula en ellos supera los mil millones de julios, el equivalente a más de 200 kilos de TNT. Afortunadamente, no hay forma de que esa energía se libere en una explosión. (La energía no es peligrosa salvo que exista una manera de liberarla. La energía en reposo de una manzana equivale aproximadamente a un millón de toneladas de TNT, pero no supone ningún peligro, a menos que entre en contacto con una antimanzana.)

El inmenso tamaño físico del ATLAS y el CMS se corresponde con el de las

colaboraciones que se han organizado a su alrededor y se encargan de gestionarlos. Los dos grupos constan aproximadamente del mismo número de personas: más de 3.000 científicos cada uno, provenientes de más de 170 instituciones de treinta y ocho países. El grupo al completo nunca se reúne en un mismo lugar al mismo tiempo, pero un flujo interminable de correos electrónicos y videoconferencias permite a los distintos subgrupos mantenerse en contacto permanente.

Puesto que estas dos grandes colaboraciones realizan experimentos muy similares en busca básicamente de los mismos fenómenos, ¿quiere decir esto que compiten entre sí? ¿En serio? Es muchísimo lo que está en juego y la competencia entre ambos experimentos es muy intensa —si bien, en su mayor parte, respetuosa—, puesto que ambos luchan por ser los primeros en realizar nuevos descubrimientos. Y, con equipos de ese tamaño, también es importante la competencia dentro de cada experimento, donde varios físicos optan a los puestos de poder, al tiempo que debaten los méritos relativos de las diferentes maneras de analizar los datos.

Este sistema funciona. Puede que haga que algunos científicos se pongan de los nervios y duerman menos de lo debido, pero la rivalidad amistosa entre, y dentro de, los grupos experimentales produce ciencia de la máxima calidad. Todos quieren ser los primeros, pero nadie quiere equivocarse; si cometes algún descuido, alguien se dará cuenta enseguida. La capacidad bien equilibrada de los equipos del CMS y el ATLAS es uno de los motivos de mayor peso por los que deberíamos confiar en los resultados en los que ambos concuerdan. Incluido el descubrimiento del bosón de Higgs.

COLISIONES DE PROTONES

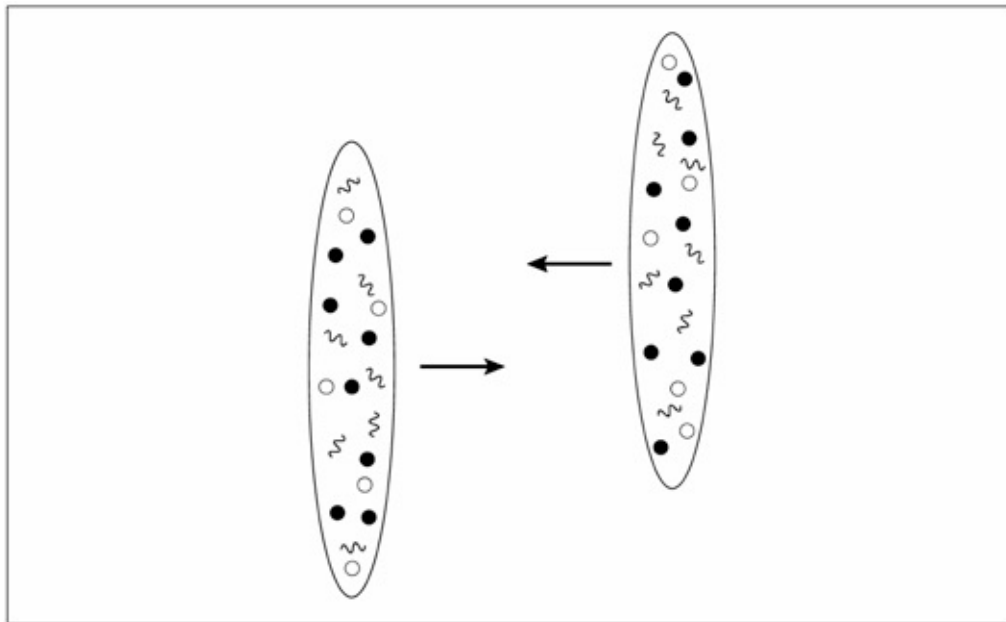
La tarea de estos gigantescos experimentos es entender lo que sucede cuando chocan dos protones a energías extraordinariamente elevadas. Un protón no es ni

una partícula infinitamente pequeña ni una masa amorfa de sustancia protónica. Está formado por muchos componentes que interactúan fuertemente entre sí. Se suele decir que «un protón está compuesto de tres quarks», pero esa afirmación es algo imprecisa. Los dos quarks up y el quark down que hacen que el protón sea un protón se denominan «quarks de valencia». Además de estos, la mecánica cuántica predice que existe una gran cantidad de «partículas virtuales» que se crean y se desintegran constantemente: gluones y pares quark-antiquark. Es la energía contenida en esas partículas virtuales la que explica por qué los protones son mucho más pesados que los quarks de valencia que les proporcionan su identidad. No es fácil dar una cifra precisa del número de partículas que existen, ya que esta depende del grado de detalle con el que observemos. (He aquí una buena muestra de cómo funciona la mecánica cuántica.) Pero la cantidad de quarks de valencia permanece constante. Si calculamos el número total de quarks up en el interior de un protón en cualquier momento dado, este debe superar siempre exactamente en dos unidades al de quarks antiup. De manera análoga, el número total de quarks down es siempre uno más que el de antidowns.

Básicamente, un protón es una bolsa flexible llena de quarks, antiquarks y gluones que se mueven alrededor del tubo de los haces del LHC casi a la velocidad de la luz. Richard Feynman les puso a todas estas partículas el sobrenombre de «partones». Según la relatividad, los objetos que se desplazan a una velocidad próxima a la de la luz se contraen a lo largo de la dirección de su movimiento. Por lo tanto, los dos protones que chocan en el interior del detector son sendos conjuntos de partones con aspecto de tarta, que vuelan el uno directamente contra el otro. Como consecuencia, es difícil saber exactamente cuánta energía interviene en una colisión, porque no sabemos entre cuáles de los partones se produjo la interacción.

Las condiciones dentro de un experimento del LHC pueden llegar a ser muy extremas. Cada haz contiene alrededor de 1.400 paquetes de protones, y uno de estos paquetes moviéndose en un sentido se cruza en el interior del detector con

otro que lo hace en sentido contrario unas 20 millones de veces por segundo. Cada paquete agrupa más de 100.000 millones de protones, por lo que son muchas las partículas dispuestas a interactuar. Sin embargo, aunque el tamaño de los paquetes es muy reducido (un par de milésimas de centímetro de diámetro), no dejan de ser enormes en comparación con un protón: prácticamente todo el volumen del paquete es espacio vacío. Cada vez que dos paquetes se cruzan, con sus miles de millones de protones, solo se producen del orden de unas veinte interacciones.



Representación de la aproximación de dos protones. Estos, que normalmente tienen forma esférica, se achatan por los efectos de la relatividad cuando se mueven a velocidades próximas a la de la luz. En el interior de los protones están los partones, entre los que se encuentran los quarks (círculos oscuros), los antiquarks (círculos claros) y los gluones (garabatos). El número de quarks es tres unidades mayor que el de antiquarks. Esos son los quarks de valencia, mientras que el resto de los partones son partículas virtuales.

Pero veinte interacciones son muchas interacciones. Una sola colisión de dos protones suele dar lugar a un caótico chorro de partículas, hasta cien hadrones por cada evento. Hemos de hacer frente al riesgo de «pileup» (cuando se

producen muchos eventos simultáneamente en el interior del detector, lo que hace que sea difícil distinguir qué es lo que ha sucedido en cada uno de ellos). Este es uno de los muchos motivos por los que el CMS y el ATLAS deben llevar al límite la tecnología y la capacidad de computación disponibles actualmente. Que se produzcan más colisiones es positivo porque supone que habrá más datos, pero demasiadas colisiones simultáneas harán que sea imposible dilucidar lo que está sucediendo.

PARTÍCULAS EN LA CÁMARA

La construcción de un detector de partículas tiene su lógica, que viene determinada por las propias partículas. ¿Qué es lo que podría surgir de una colisión? Únicamente las diversas partículas del Modelo Estándar que tan bien conocemos y tanto nos gustan: los seis quarks, los seis leptones y los varios bosones que transmiten las fuerzas. (Esperamos producir tipos de partículas completamente nuevos, pero estos normalmente se desintegrarán en partículas del Modelo Estándar.) Lo único que tenemos que hacer es tener en cuenta estas posibilidades y preguntarnos cuál sería la mejor manera de detectarlas e identificarlas correctamente. Repasemos la lista.

QUARKS

Podemos agrupar todos los quarks, porque nunca los observamos por separado, ya que están confinados dentro de los hadrones. Pero en una colisión se puede crear un par quark-antiquark, y ambas partículas saldrían despedidas en direcciones opuestas. En ese caso, lo que sucede es que la fuerza nuclear fuerte que rodea a los quarks hace acto de presencia y un rocío de hadrones se condensa alrededor de la partícula original. Esto se refleja en el detector en

forma de los jets mencionados anteriormente. Nuestro trabajo consiste entonces en detectar los hadrones resultantes, una tarea relativamente sencilla, y reconstruir los jets individuales, lo cual puede resultar bastante más laborioso. Puede que sea difícil distinguir el tipo de quark que se produce, aunque tenemos nuestros trucos. Por ejemplo, los quarks bottom duran el tiempo suficiente para que recorran una distancia minúscula antes de desintegrarse. Las partículas que resulten de la desintegración aparecen ligeramente desplazadas de la colisión principal, lo que puede utilizarse para identificar a los quarks bottom aunque no podamos ver sus trazas directamente.

GLUONES

Aunque son bosones, no fermiones, los gluones son sensibles a la interacción fuerte, por lo que se reflejan en el detector de manera similar: como un jet de hadrones. Con la diferencia de que es posible distinguir a un solo gluón (por ejemplo, si lo emite un quark), mientras que los quarks recién generados siempre vienen acompañados de sus correspondientes antiquarks. Si en un evento se detectan tres jets, eso significa que se han producido un par quark-antiquark y un gluón. Sau Lan Wu y sus colaboradores se basaron en eventos como ese para determinar que los gluones son reales.

BOSONES W, BOSONES Z, LEPTONES TAU, BOSONES DE HIGGS

Agrupamos todas estas partículas, bastante distintas entre sí, por una sencilla razón: son muy pesadas, y por tanto de vida muy corta, y se desintegran rápidamente en otras partículas (tanto que nunca aparecerán directamente en el detector). Debemos inferir su existencia observando los resultados de su desintegración. De la lista, los leptones tau son los que tienen una vida media

más larga y, si las circunstancias son las apropiadas, pueden durar lo suficiente como para ser identificados.

ELECTRONES Y FOTONES

Son las partículas más fáciles de detectar y de medir con precisión. No se dividen en caóticos chorros de partículas como los quarks y los gluones, pero tienen predisposición a interactuar con las partículas cargadas de un material, dando lugar a corrientes eléctricas que es fácil identificar. También es sencillo distinguirlos entre sí, porque los electrones (y los positrones, sus antipartículas) poseen carga eléctrica, y por tanto un campo magnético hace que se desvíen, mientras que los fotones son neutros, y lo atraviesan en línea recta sin trabas.

NEUTRINOS Y GRAVITONES

Estas son las partículas insensibles tanto a la fuerza nuclear fuerte como a la electromagnética. Como consecuencia, en la práctica no hay manera de capturarlas en el detector y pasan desapercibidas. Los gravitones solo se producen mediante la interacción gravitatoria, tan débil que en el colisionador prácticamente no se produce ningún gravitón, por lo que no debemos preocuparnos por ellos. (En ciertas teorías exóticas, la gravedad, a altas energías, es efectivamente intensa y se producen gravitones. Desde luego, los físicos no descartan esta posibilidad.) Los neutrinos, por su parte, provienen de las interacciones débiles, por lo que se producen constantemente. Por suerte, son las únicas partículas del Modelo Estándar que pueden producirse pero no detectarse, así que la regla es sencilla: cualquier cosa que no se detecte probablemente sea un neutrino.

Cuando chocan dos protones, ambos se desplazan a lo largo del tubo del haz,

por lo que el momento total en direcciones perpendiculares al haz es cero. (El momento de una partícula es la cantidad de impulso que lleva en la dirección de su movimiento. Cuando hay varias partículas, simplemente sumamos sus distintos momentos, que pueden dar un resultado nulo cuando las partículas se mueven en direcciones opuestas.) El momento se conserva, de manera que su valor total también debería ser cero tras la colisión. Por lo tanto, podemos medir el momento de las partículas que sí detectamos y, si el resultado no es cero, sabremos que debe haber neutrinos moviéndose en la otra dirección para compensar. Es lo que se conoce como método del «momento transversal desaparecido», o simplemente de la «energía desaparecida». Puede que no sepamos cuántos neutrinos se han llevado consigo el momento que falta, pero con frecuencia podemos deducirlo sabiendo cuáles han sido las otras partículas que se han producido. (Una interacción débil que produce un muón también generará un neutrino muónico, por ejemplo.)

MUONES

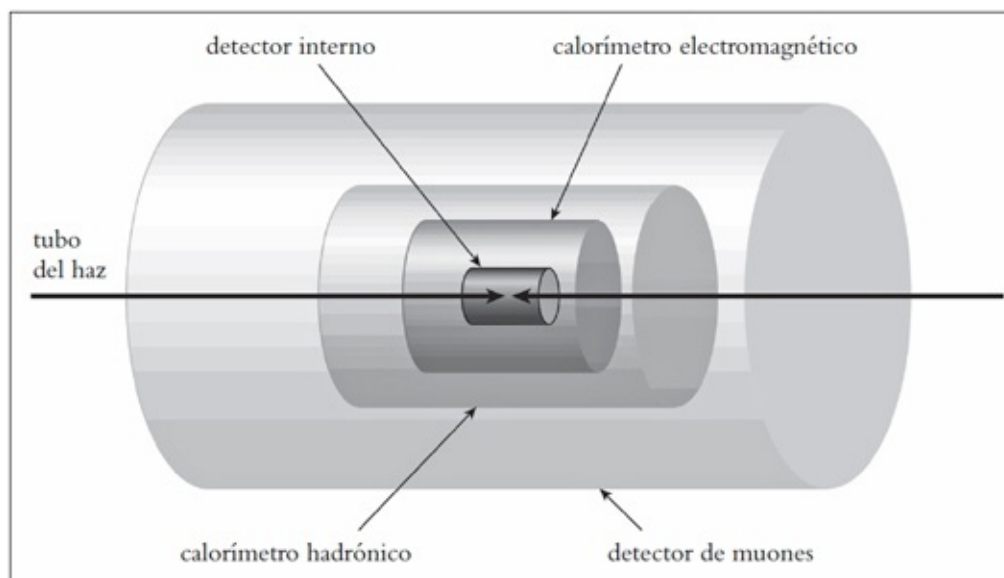
Eso nos deja con el muón, una de las partículas más enigmáticas desde el punto de vista de un experimento del LHC. Como los electrones, dejan un rastro eléctrico fácilmente detectable y describen una trayectoria curva en el interior de un campo magnético. Pero son cientos de veces más pesados que el electrón. Lo que significa que pueden desintegrarse en partículas más ligeras, aunque su vida media es bastante larga: a diferencia del tau, que es aún más pesado, por lo general los muones viven lo suficiente como para llegar al extremo del detector. Y lo sobrepasan, porque los muones suelen atravesar los materiales, en lugar de ser capturados. Esa es la ventaja que tiene ser mucho más pesados que los electrones, pero insensibles a la interacción fuerte. Un muón atravesará pesadamente todas las capas del experimento, como un Jeep atraviesa un campo de trigo, dejando un rastro fácilmente reconocible a su paso.

Los muones se comportan como superrayos X, que penetran profundamente en la materia ordinaria. Hace años, Luis Álvarez, que recibió el premio Nobel por encontrar todos esos hadrones en el Bevatrón, sacó buen provecho de esta propiedad. A Álvarez le fascinaban las pirámides de Egipto, en particular las grandes pirámides del faraón Jufu (Jéops, más conocido como Keops) y su hijo Jafra (Jefrén, más conocido como Kefrén), que se encuentran muy próximas entre sí en Giza, a las afueras de El Cairo. La de Jufu es la Gran Pirámide, y originalmente era algo mayor que la de Jafra, aunque la erosión externa ha hecho que actualmente esta última sea algo más grande. En el interior de la pirámide de Jufu se encuentran tres cámaras, mientras que la de Jafra parece ser sólida, salvo por una cámara funeraria a nivel del suelo. Durante muchos años, esta diferencia ha desconcertado a los arqueólogos, muchos de los cuales creen que en la pirámide de Jafra hay cámaras aún por descubrir.

Álvarez, un brillante físico aficionado a los rompecabezas, tuvo una idea: utilizar muones procedentes del espacio en forma de rayos cósmicos para explorar el interior de la pirámide de Jafra. El experimento sería bastante rudimentario, pero permitiría distinguir entre la roca sólida y una cámara vacía. El equipo de físicos egipcios y estadounidense dirigido por Álvarez montó un detector de muones en la única cámara que se conocía, en la parte más baja de la pirámide, con la intención de contar el número de muones que llegaban hasta allí desde distintas direcciones. Era el año 1967, y el proyecto tuvo que retrasarse cuando estalló la guerra árabe-israelí la víspera de la primera toma de datos. Pero finalmente lo pusieron en marcha y descubrieron... nada. Parecía que la pirámide tenía la misma capacidad de detener muones en todas las direcciones, lo que chocaba con la esperanza de que algunas direcciones dejaran pasar más muones porque contuviesen una cámara vacía. A día de hoy, continúa siendo un enigma la razón por la que la pirámide del hijo es notablemente menos compleja que la del padre.

CAPAS DE DETECTORES

Los experimentos del ATLAS y el CMS han acordado la estrategia de extraer la máxima información posible de las colisiones de partículas que observan. Ambos detectores están contruidos por capas, con cuatro piezas de equipamiento diferentes con propósitos muy específicos: un detector interno, rodeado por un calorímetro electromagnético, que a su vez está rodeado por un calorímetro hadrónico, y por último un detector de muones en la parte más externa. Todas las partículas que se produzcan en una colisión radiarán hacia fuera desde el punto donde esta se haya producido, y atravesarán las distintas capas hasta que sean finalmente capturadas o logren escapar al mundo exterior.



Representación de un experimento de partículas de propósito general, como el ATLAS o el CMS. La zona central contiene un detector interno que mide las trayectorias de las partículas cargadas. A continuación, se encuentra el calorímetro electromagnético, que captura los fotones y los electrones. Después, el calorímetro hadrónico, que captura los hadrones. Por último, el detector de muones, que sigue las trayectorias de este tipo de partículas.

La función del detector interno, la capa más profunda de la cebolla, es actuar

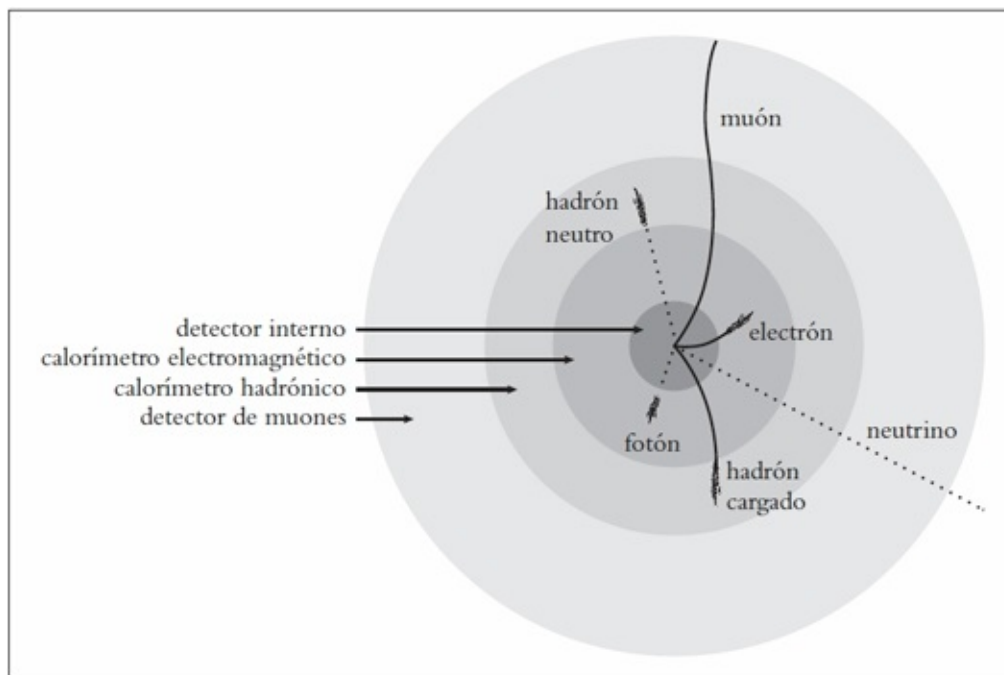
como un rastreador que proporciona información precisa de las trayectorias de las partículas cargadas que se alejan del punto de colisión. No es una tarea fácil: cada centímetro cuadrado del instrumento sufre el bombardeo de decenas de millones de partículas cada segundo. Cualquier cosa que se coloque ahí tiene que poder hacer su trabajo al tiempo que soporta la exposición a una cantidad inaudita de radiación. De hecho, en los primeros esbozos del diseño del CMS esta región del detector aparecía vacía, ya que los físicos no creían que fuesen capaces de construir un instrumento de precisión que funcionase en esas condiciones. Afortunadamente, los rumores de que los militares habían resuelto el problema de crear instrumentos electrónicos de medida capaces de funcionar adecuadamente en entornos tan hostiles como este los espolearon a perseverar. Finalmente, lograron encontrar la manera de incrementar la «robustez» de unos instrumentos electrónicos de alta calidad que no estaban inicialmente diseñados para soportar tales condiciones.

Los detectores internos son máquinas complejas con muchos componentes, y con características ligeramente distintas entre los dos experimentos. El del ATLAS, por ejemplo, consta de tres instrumentos diferentes: un detector de píxeles con una resolución extraordinariamente fina; un dispositivo de seguimiento semiconductor construido a base de tiras de silicio; y otros dispositivos de seguimiento de la radiación de transición, hecho de cable de tungsteno revestido de oro, en el interior de finos tubos llamados «pajitas». La función del detector interno es registrar las trayectorias de las partículas con la mayor precisión posible, lo que permite a los físicos reconstruir los puntos de interacción desde los que surgen.

En las siguientes capas se encuentran los calorímetros, electrónico y hadrónico. «Calorímetro» es una manera fina de decir «dispositivo para medir energías», igual que las «calorías» sirven para cuantificar la energía contenida en la comida que ingerimos. El calorímetro electromagnético es capaz de capturar electrones y fotones a través de sus interacciones con los núcleos y los electrones del propio calorímetro. Las partículas sensibles a la interacción fuerte

normalmente atraviesan ese primer calorímetro, y son capturadas por el calorímetro hadrónico. Este componente consta de varias capas de metal denso, que interactúan con los hadrones, intercaladas con cristales de centelleo, que miden la cantidad de energía depositada. Medir las energías de las partículas es un paso clave para identificar lo que son, y normalmente también la masa de la partícula de cuya desintegración proceden.

En la capa final de los experimentos están los detectores de muones. Los muones poseen momento suficiente como para atravesar ambos calorímetros, pero sus trayectorias se pueden medir con precisión en las enormes cámaras magnéticas que los rodean. Esto es importante, porque los muones no se crean en las interacciones fuertes (ya que son leptones, no quarks), y rara vez mediante las interacciones electromagnéticas (puesto que son muy pesados, y resulta más fácil producir electrones). Por lo tanto, los muones por lo general proceden de las interacciones débiles, o de algo completamente nuevo. Ambas alternativas son interesantes, y los muones desempeñan un papel importante en la búsqueda del Higgs.



Sección transversal de un experimento, en la que se puede ver el comportamiento de distintas partículas. Las partículas neutras, como los fotones y los hadrones neutros, son invisibles para el detector interno, pero las partículas cargadas dejan rastros curvos. Los fotones y los electrones son capturados por el calorímetro electromagnético, mientras que el calorímetro hadrónico captura los hadrones. Los muones consiguen llegar al detector externo, y los neutrinos escapan por completo a la detección. En el experimento CMS, la trayectoria de los muones se curva en sentido contrario en el detector externo, porque el campo magnético apunta en dirección opuesta.

Ahora vemos por qué el diseño de los experimentos ATLAS y CMS tiene la forma que tiene. Los detectores internos proporcionan información precisa sobre las trayectorias de todas las partículas cargadas que surgen de las colisiones. El calorímetro electromagnético captura los electrones y los fotones y mide sus energías, el mismo destino que les espera a las partículas sensibles a la interacción fuerte en el calorímetro hadrónico. Los muones escapan a los calorímetros, pero se estudian en detalle en el detector de muones. De entre las partículas conocidas, únicamente los neutrinos escapan sin ser detectados, y podemos inferir su existencia fijándonos en el momento desaparecido. En conjunto, una ingeniosa estrategia para extraer toda la información posible de las colisiones de protones en el LHC.

SOBRECARGA DE INFORMACIÓN

En el LHC, los paquetes de protones entran en colisión 20 millones de veces por segundo. Cada cruce de los paquetes da lugar a decenas de colisiones, de manera que cada segundo tienen lugar cientos de millones de colisiones. Cada una de las cuales es como si estallasen fuegos artificiales dentro del detector, lo que produce numerosas partículas, hasta más de cien cada vez. Y los instrumentos delicadamente calibrados que se encuentran en el interior de los experimentos recopilan información precisa sobre lo que hace cada una de esas partículas.

Eso es muchísima información. Un solo evento de colisión en el LHC da lugar a casi un megabyte de datos. (Los datos sin tratar suman más de veinte megabytes, pero las ingeniosas técnicas de compresión los reducen hasta cerca de un megabyte.) Ese es el tamaño del texto de un libro grueso, o la memoria RAM total que ocupa el sistema operativo del transbordador espacial. Hoy en día, el disco duro de un ordenador doméstico decente puede almacenar un terabyte de datos, un millón de megabytes, algo enorme (el texto de todos los libros de la Biblioteca del Congreso ocupa solo unos veinte terabytes). En uno de esos discos duros ordinarios se podrían almacenar un millón de eventos del LHC, lo cual suena bastante bien... hasta que recordamos que se producen cientos de millones de estos eventos por segundo. Se llenarían mil discos duros cada segundo. Algo que no es factible, ni siquiera teniendo en cuenta que el CERN puede permitirse mejores discos duros que el que tiene nuestro ordenador portátil.

Además del LHC, la mayor base de datos del mundo es la del World Data Center for Climate, en Alemania, que contiene alrededor de seis petabytes de datos sobre el clima, seis mil terabytes. Si grabásemos todos los datos generados en el LHC, sobrepasaríamos la capacidad de una base de datos de ese tamaño en un par de segundos. Bienvenido al mundo del Big Data.

Claramente, el almacenamiento de los datos (y su transmisión y análisis) en el LHC constituye un desafío mayúsculo, al que se hace frente mediante una combinación de muchas técnicas diferentes. La más importante de las cuales, no obstante, es también la más básica: empezar por no grabar los datos. Merece la pena recalcarlo: la inmensa mayoría de los datos que recopila el LHC se descartan al instante. No cabe otra opción; no hay manera posible de grabarlo todo.

El lector podría pensar que una estrategia más efectiva en lo que se refiere a los costes podría pasar por ni siquiera producir tantos datos, por ejemplo reduciendo la luminosidad de la máquina. Pero la física de partículas no funciona así. Cada colisión es importante, incluso aunque no grabemos sus datos

en disco. La razón es que la mecánica cuántica, responsable en última instancia de las interacciones que dan lugar a estas partículas, solo predice la probabilidad de ciertos resultados. No podemos elegir lo que sucederá cuando chocan dos protones, tenemos que aceptar lo que la naturaleza nos ofrece. La gran mayoría de las veces, lo que nos da es bastante aburrido, al menos en el sentido de que son cosas que ya entendemos. Para generar una pequeña cantidad de eventos interesantes debemos producir un número enorme de eventos corrientes y molientes, y buscar entre ellos rápidamente las perlas interesantes.

Lo cual da lugar a un problema distinto, claro: cómo determinar si un evento es «interesante», y cómo hacerlo con la mayor celeridad, para poder decidir si merece la pena conservar los datos. Esa es la función del disparador, uno de los elementos más fundamentales de los experimentos del LHC.

El disparador es en sí mismo una combinación de hardware y software. El disparador de primer nivel traslada los resultados de todos los instrumentos del experimento a un almacenamiento electrónico temporal y lleva a cabo un escaneo ultrarrápido (en aproximadamente un microsegundo) para ver si se está produciendo algo potencialmente interesante. Alrededor de diez mil eventos de cada mil millones reciben el sello de aprobación y pasan el filtro. El disparador de segundo nivel es un sofisticado programa informático que estudia caracterizaciones más precisas de los eventos (de forma muy similar a un médico de urgencias que realiza un rápido diagnóstico preliminar, al que siguen pruebas más precisas) para determinar los eventos que se grabarán para su análisis posterior. De los muchos millones que se producen cada segundo, solo se acaban almacenando varios cientos de eventos. Pero son los más interesantes.

Como podrá imaginar el lector, se dedicó mucho trabajo y muchas discusiones animadas a decidir qué eventos preservar y cuáles desechar. Es natural la inquietud por la posibilidad de que entre todo el material descartado haya verdaderas perlas, por lo que los físicos del CMS y el ATLAS trabajan constantemente para refinar sus disparadores en respuesta tanto a mejoras en los procesos experimentales como a nuevas ideas de los teóricos.

COMPARTIR LOS DATOS

Incluso después de haber hecho que todos los datos pasen por el disparador, sigue habiendo cientos de eventos por segundo, cada uno de ellos caracterizado mediante alrededor de un megabyte de datos. Ahora tenemos que analizarlos. Con «tenemos» me refiero a «los miles de miembros de los experimentos ATLAS y CMS, que trabajan en instituciones de todo el mundo» (y entre los que, en realidad, yo no me cuento). Para que los físicos analicen los datos necesitan poder acceder a ellos, lo que supone un reto para la transmisión de información. Por suerte, este problema ya estaba previsto desde hace años, y los físicos y los informáticos han trabajado duro para construir una Worldwide LHC Computing Grid (Red de Computación de Alcance Mundial del LHC) que conecta centros de computación en treinta y cinco países utilizando una combinación de la internet pública y cables de fibra óptica privados. En 2003 se estableció un nuevo récord en la transmisión terrestre de datos cuando más de un terabyte de información recorrió los más de ocho mil kilómetros que separan el CERN del Caltech en menos de treinta minutos. Esto equivale a descargar una película de duración estándar en siete segundos.

Hacen falta velocidades tan desorbitadas como esa: en 2010, los cuatro experimentos más importantes del LHC generaron más de trece petabytes de datos. La Grid, como se la conoce cariñosamente, toma estos datos y los distribuye entre distintos centros de computación de todo el mundo, que están organizados en varias capas. La capa 0 la constituye el propio CERN. Hay once sitios en la capa 1, cuyo papel es importante a la hora de cribar y clasificar los datos, y 140 sitios en la capa 2, en los que se llevan a cabo tareas de análisis específicas. De esta manera, cualquier físico en el mundo que quiera analizar datos del LHC no necesita conectarse directamente al CERN, lo que pondría en riesgo al conjunto de internet.

La necesidad agudiza el ingenio. No debería sorprender a nadie saber que los retos tan específicos en cuanto al tratamiento de datos a los que han tenido que hacer frente los físicos han dado lugar a soluciones también a medida. Una de esas soluciones, de hace ya muchos años, ha cambiado nuestra forma de vida: la World Wide Web. Los orígenes de la web se remontan a una propuesta de Tim Berners-Lee, que por aquel entonces trabajaba en el CERN y actualmente dirige el World Wide Web Consortium. Berners-Lee pensó que sería útil para los físicos del laboratorio tener acceso a distintos tipos de información, almacenada en ordenadores distribuidos, a través de un sistema de hipertexto basado en documentos web y en los enlaces entre ellos. La WWW es este sistema de ficheros intervenculados, edificado sobre la red de transmisión de datos que conocemos como internet (en cuya creación el CERN no tuvo nada que ver). La web tal y como la conocemos actualmente, con todos sus efectos sobre nuestras vidas, es un producto derivado de la investigación básica en física de partículas.

Fabiola Gianotti, la física italiana que dirige actualmente el ATLAS, me contó que la sorpresa más agradable cuando el LHC se puso en marcha por primera vez no fue el rendimiento de su experimento (aunque eso fuera bastante impresionante), sino que el sistema de transmisión de datos funcionó sin ningún problema desde el primer momento. Y no es que el proceso hubiese carecido por completo de dificultades. En septiembre de 2008, poco antes de que circularan las primeras partículas por el LHC, un grupo autodenominado Greek Security Team se infiltró en el sistema de ordenadores del CMS. No causaron ningún daño real, e incluso afirmaron que habían hecho un servicio público al sustituir una página web con una advertencia en griego que decía: «Os hemos bajado los pantalones porque no queremos ver cómo os paseáis por ahí desnudos tratando de ocultaros cuando llegue el pánico». El orden se restableció enseguida, y el percance no provocó ningún retraso en el experimento, aunque es probable que sí hiciese que se prestase más atención a la seguridad de la red informática del CERN.

Con el LHC ya en marcha, el CMS y el ATLAS funcionando a pleno

rendimiento, y los datos compartiéndose y analizándose rápidamente por todo el mundo, ya están en su lugar todas las piezas necesarias para el asalto frontal a una de las cuestiones importantes de la física de partículas. Ya tenemos una nueva partícula en el zurrón, ahora vamos a buscar más.

Partículas en las ondas

Donde sugerimos que todo lo que existe en el universo está compuesto por campos: campos de fuerza que atraen y repelen, y campos de materia cuyas vibraciones son las partículas.

Insane Clown Posse, un dúo de hip hop famoso por sus letras provocativas y su inquietante maquillaje de payasos, causó revuelo en 2010 con su single «Miracles». A esas alturas de su carrera, no era la primera vez que Violent J y Shaggy 2 Dope (no son sus nombres de pila) se veían envueltos en la polémica. Habían tenido un enfrentamiento con Eminem, habían probado su suerte (sin éxito) como luchadores profesionales, y en una ocasión dieron un breve concierto ante un público perplejo antes de darse cuenta de que se habían equivocado de local. Sus canciones cuentan historias de necrofilia y canibalismo, y en una de ellas dicen maldades de Santa Claus. Además, Violent J había sido arrestado tras un concierto por golpear treinta veces a una persona del público con su micrófono.

Pero la controversia alrededor de «Miracles» era distinta. Los muchachos no tenían intención de escandalizar, sino que lo que querían era compartir su asombro ante el mundo que nos rodea. La letra decía así:

*Detente y mira a tu alrededor, todo es alucinante
Agua, fuego, aire y tierra
P**os imanes,
¿Cómo funcionan?*

Gracias a la magia de internet, este pequeño fragmento logró una apreciable notoriedad, en particular entre tipos interesados por la ciencia y deseosos de explicar que en realidad tenemos bastante claro cómo funcionan los imanes.

Me gustaría hacer una breve defensa de Insane Clown Posse. Sí, entendemos el magnetismo desde hace ya bastante tiempo, y la investigación científica normalmente acrecienta nuestra admiración por los fenómenos naturales, en lugar de quitarle la magia a todo. Sin embargo, su canción pone de relevancia un hecho importante que no deberíamos pasar por alto tan rápidamente: los imanes son en verdad alucinantes.

Lo asombroso de los imanes no es que se peguen al metal (hay muchas cosas que se pegan a otras cosas, desde las salamanquesas a los chicles). Lo asombroso es que, cuando se acerca un imán a un pedazo de metal se puede sentir la atracción antes incluso de que se toquen. Los imanes no son como la cinta adhesiva o el pegamento, que deben entrar en contacto con algo para poder pegarse. Los imanes extienden su efecto, a través del espacio aparentemente vacío, para atraer a los objetos. Es algo bastante raro, si nos paramos a pensarlo.

Los físicos denominan a este tipo de fenómenos «acción a distancia» y en otra época fue motivo de perplejidad para las mentes más preclaras del mundo, como ahora lo es para Violent J y Shaggy 2 Dope. Hoy en día nos preocupa menos, porque hemos comprendido que, en realidad, el espacio a través del cual el imán extiende su influencia no está «vacío» en absoluto. Lo ocupa un campo magnético (líneas de fuerza invisibles que salen del imán) dispuesto a tirar de cualquier cosa que se ponga en su camino. Podemos hacer que estas líneas de fuerza nos resulten más tangibles colocando el imán junto a pequeñas virutas de hierro, que se alinearán con el campo magnético creando hermosas formas.

Lo importante es que el campo magnético existe tanto si tiene algo de lo que tirar como si no. Si hay imán, hay campo magnético a su alrededor, aunque no lo podamos ver. El campo es más intenso cerca del imán y se debilita al alejarnos de él. De hecho, existe un campo magnético en absolutamente todo punto del espacio, con independencia de si hay imanes cerca o no. El campo puede ser

muy pequeño —o incluso exactamente cero—, pero en cualquier punto existe una respuesta para la pregunta: «¿Cuál es el valor del campo magnético aquí?». (Es «el» campo magnético, y no un campo magnético distinto para cada imán: si aproximamos dos imanes, sus campos simplemente se suman.)

No estoy seguro de que a Insane Clown Posse le interese saberlo, pero la importancia de los campos va mucho más allá de los imanes. En realidad, el mundo está hecho de campos. A veces, las peculiaridades de la mecánica cuántica hacen que parezca que la materia del universo está formada por partículas, pero en el fondo está compuesta por campos. El espacio vacío no está tan vacío como parece. En cualquier punto existe una amplia variedad de campos, cada uno con su correspondiente valor (o, para ser más precisos, debido a la indeterminación propia de la mecánica cuántica, con una distribución de valores posibles que podríamos observar).

Cuando hablamos de física de partículas, normalmente no hacemos hincapié en que en realidad estamos hablando de física de campos. Pero así es. El objetivo de este capítulo es reorientar la intuición del lector para que pueda apreciar que los campos cuánticos son en última instancia los elementos constituyentes de la realidad tal y como la entendemos actualmente.

Los campos en sí no están «compuestos» de nada: los campos son aquello de lo que el mundo está compuesto. No conocemos un nivel más fundamental de la realidad. (Quizá la teoría de cuerdas, pero aún no es más que una hipótesis.) El magnetismo se comunica a través de un campo, igual que la gravedad y las fuerzas nucleares. Incluso lo que llamamos «materia» —partículas como los electrones y los protones— no es en realidad más que un conjunto de campos en vibración. La partícula que denominamos «bosón de Higgs» es importante, pero no tanto en sí misma, sino porque el campo del que surge, el campo de Higgs, desempeña un papel esencial en el funcionamiento de nuestro universo. Realmente alucinante.

En los primeros capítulos del libro he ofrecido una breve introducción a las partículas del Modelo Estándar, y he comentado que todas surgen como

vibraciones de sendos campos. También en los capítulos anteriores, he hablado de los aceleradores y detectores que nos permiten explorar el mundo subatómico, incluido el LHC. En este capítulo y en el siguiente, veremos con más detalle la idea de campo, cómo las partículas surgen de los campos, cómo la simetría da lugar a las fuerzas, y cómo el campo de Higgs puede romper una simetría y proporcionarnos la variedad de partículas que observamos. Eso nos permitirá estar en condiciones de entender cómo los físicos experimentales llevan a cabo la búsqueda del Higgs, y lo que significa el hecho de que lo hayamos encontrado.

EL CAMPO GRAVITATORIO

Hoy en día aceptamos que vivimos inmersos en campos, pero los científicos tardaron un tiempo en empezar a pensar en la función de la «teoría de campos». Es posible que el lector piense que la idea de un campo gravitatorio es más evidente que la de un campo magnético, y tendría toda la razón. Pero eso no significa que sea totalmente obvia.

Según la anécdota más famosa sobre la gravedad, se supone que a Isaac Newton le cayó una manzana en la cabeza, y esa fue la inspiración que le llevó a inventar su teoría universal de la gravitación. (Es famosa sobre todo porque el propio Newton no paraba de contarla años más tarde, en un innecesario intento de contribuir aún más a su leyenda como genio.) En su versión más sencilla, la anécdota cuenta cómo la manzana ayudó a Newton a «inventar», o quizá a «descubrir», la gravedad, aunque si lo pensamos por un momento nos daremos cuenta de que esto no tiene sentido. La gente sabía que la gravedad existía desde mucho antes de Newton: no es que nadie se hubiese dado cuenta nunca de que las manzanas caen hacia abajo, no hacia arriba.

Lo que Newton intuyó fue la relación entre la caída de una manzana y el movimiento de los planetas. No inventó la gravedad, sino que se dio cuenta de

que era universal; la atracción gravitatoria que hace que los planetas orbiten alrededor del Sol y que la Luna lo haga alrededor de la Tierra era la misma fuerza que tiraba de las manzanas hacia el suelo. Puede que piense que ni siquiera esta intuición es material suficiente para que se forje una leyenda. A fin de cuentas, hay algo que evita que los planetas salgan despedidos por el espacio, y también hay algo que hace que las manzanas caigan al suelo, así que ¿por qué no habrían de ser la misma cosa?

Si piensa así, es únicamente porque vive en un mundo pos-newtoniano. Antes de Newton, no habríamos pensado que la responsable de que la manzana cayese era la Tierra, sino que hubiéramos pensado que era la propia manzana. Aristóteles, por ejemplo, pensaba que los distintos tipos de materia poseían sus propios estados naturales del ser. El estado natural de un cuerpo pesado era estar en el suelo. Si lo levantamos, lo que quiere es caer.

La idea de que la caída se debe a una inclinación natural del objeto, y no a que la Tierra tire de él, es de hecho bastante intuitiva. Hace tiempo trabajé como consultor científico para una película de gran presupuesto en Hollywood, en la que los diseñadores habían pensado que estaría muy bien representar una trepidante escena de lucha en un planeta que tuviera forma de disco, en lugar de ser esférico. Y estaría muy bien, eso no se puede discutir. Pero pensaban hacer que, en el momento culminante de la escena, los malos se cayesen del borde del planeta, empujados por... ¿qué, exactamente? Si uno piensa que caer es algo que las cosas hacen de forma natural, y no una consecuencia de que algún objeto grande tire de ellas debido a la gravedad, es natural cometer un error como este. (Pero conseguimos que no lo incluyesen en la película.)

Newton propuso que cada objeto del universo ejerce una fuerza gravitatoria sobre cualquier otro. Los objetos más pesados ejercen una fuerza mayor, y los más cercanos se ven afectados con mayor intensidad que los que se encuentran más alejados. Esta idea encaja perfectamente con los datos, y supone una maravillosa unificación de lo que ocurre en la Tierra y lo que sucede en el firmamento.

Pero la teoría de Newton incomodó a mucha gente. ¿Cómo sabe la Luna, por ejemplo, que la Tierra ejerce una fuerza gravitatoria sobre ella? Al fin y al cabo, la Tierra está muy lejos, y estamos acostumbrados a que las fuerzas se ejerzan cuando nos topamos con las cosas, no cuando estamos en otra parte del universo. Eso es lo desconcertante de la «acción a distancia», algo que perturbaba al propio Newton tanto como a sus críticos. Pero llega un momento en que, si tu teoría describe asombrosamente bien un gran número de fenómenos, te encoges de hombros y reconoces que, al parecer, la naturaleza sencillamente funciona así. Es muy similar a la situación en la que nos encontramos hoy en día con respecto a la mecánica cuántica: una teoría que cuadra con los datos, pero que creemos que no entendemos todo lo bien que deberíamos.

No fue hasta finales del siglo XVIII cuando un físico francés, Pierre-Simon de Laplace, demostró que para entender la gravedad newtoniana no era necesario recurrir al esotérico concepto de acción a distancia. Laplace se dio cuenta de que podía imaginar un campo que se extendía por todo el espacio, que más tarde recibiría el nombre de «campo potencial gravitatorio». La presencia de cuerpos masivos perturba el potencial gravitatorio, de manera similar a como la temperatura del aire en una habitación se ve afectada por un horno caliente. La perturbación es más intensa en las inmediaciones del objeto y se debilita al alejarse de él. La fuerza debida a la gravedad surge porque es el propio campo el que empuja los objetos: sienten un impulso en la dirección del campo potencial gravitatorio, de forma muy parecida a una pelota que, situada sobre una superficie irregular, empieza a rodar en la dirección en la que disminuye la altura de la superficie.

Matemáticamente, la teoría de Laplace es idéntica a la de Newton. Pero, conceptualmente, encaja mucho mejor con nuestra intuición de que la física, como la política, es local. No es que la Tierra extienda su influencia y atraiga a la Luna, sino que afecta al potencial a su alrededor, que a su vez perturba el potencial algo más allá, y así, gradualmente, hasta llegar a la Luna (y más allá).

La fuerza de la gravedad no es un misterioso efecto que recorre instantáneamente distancias infinitas, sino que surge de la variación progresiva de un campo infinito que permea todo el espacio.

EL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO

Fue en el estudio del electromagnetismo donde se consolidó la idea de los campos. Existe un campo eléctrico, y también un campo magnético, pero los físicos se refieren a ambos con una sola palabra, «electromagnetismo», para indicar que en realidad se trata de dos manifestaciones distintas de un mismo campo fundamental. La conexión entre ambos no siempre fue tan evidente.

Se sabía de la existencia del magnetismo desde los tiempos de la Antigüedad, por supuesto. La dinastía Han, en China, había desarrollado brújulas magnéticas hace más de dos mil años. Y la electricidad se conocía, tanto en forma de las descargas que producen las anguilas como de electricidad estática que se acumula en el ámbar cuando este se frota con un pedazo de tela. Incluso había ciertos indicios de que ambos fenómenos estaban relacionados: Benjamin Franklin, cuando no estaba volando cometas o fomentando rebeliones, demostró que era posible magnetizar agujas con electricidad.

Pero esas ideas no encajaron verdaderamente hasta 1820, cuando un físico danés llamado Hans Christian Ørsted impartía una clase sobre la naturaleza de la electricidad y el magnetismo. Ørsted había ideado una ingeniosa manera para demostrar la hipotética conexión entre ambos: construir un circuito eléctrico y hacer circular la corriente junto a una brújula para ver si eso desviaba la aguja respecto al norte magnético. Por desgracia, un accidente le impidió realizar el experimento antes de que llegase la hora de dar su clase, así que decidió hacerlo directamente delante de la multitud congregada, convencido de que tendría éxito... y así fue. Pulsó un interruptor, la corriente eléctrica fluyó por el cable, y observó una pequeña pero inequívoca sacudida de la aguja de la brújula. Según

el recuento del propio Ørsted, el efecto fue muy pequeño y no causó ninguna impresión en el público. Pero, a partir de ese día, la electricidad y el magnetismo confluyeron en el electromagnetismo.

Gracias al trabajo posterior de personas como Michael Faraday y James Clerk Maxwell, se desarrolló una sofisticada teoría del campo electromagnético. Una vez establecida dicha teoría, fuimos capaces de dar respuesta a preguntas sobre la dinámica del campo. Por ejemplo, ¿qué sucede cuando se agita una carga eléctrica? (La misma cuestión se podría plantear respecto de la gravedad, pero la fuerza gravitatoria es tan débil que resultaría muy difícil darle una respuesta experimental.)

Lo que sucede cuando se agita una carga es, naturalmente, que se producen ondulaciones en el campo electromagnético. Dichas ondulaciones se propagan en forma de ondas, de manera muy parecida a las olas en el agua cuando cae una piedra. Estas ondas electromagnéticas tienen un nombre muy bueno: luz. Cuando pulsamos el interruptor de la luz, lo que sucede es que la corriente eléctrica fluye a través del filamento de la bombilla, haciendo que este se caliente. Ese calentamiento agita los átomos del filamento, con sus correspondientes electrones, haciendo que ondulen de aquí para allá, lo que a su vez produce ondas en el campo electromagnético que, cuando llegan a nuestros ojos, percibimos en forma de luz.

La identificación de la luz como ondas del campo electromagnético constituye otro gran hito en la unificación de la física. Que avanzó aún más cuando tomamos conciencia de que lo que llamamos luz visible es tan solo un determinado rango de longitudes de onda de la radiación, el que el ojo humano es capaz de observar. Entre las longitudes de onda más cortas se encuentran los rayos X y la luz ultravioleta, mientras que las más largas incluyen la luz infrarroja, las microondas y las ondas de radio. El trabajo de Faraday y de Maxwell se vio confirmado de manera espectacular en 1888, cuando el físico alemán Heinrich Hertz logró por primera vez producir y detectar ondas de radio.

Cuando utilizamos el control remoto para encender el televisor parece que sea

acción a distancia, pero en realidad no lo es. Pulsamos el botón y una corriente eléctrica empieza a agitarse en el interior de un circuito del mando, lo que produce una onda de radio que se propaga mediante el campo electromagnético hasta el televisor y es absorbida por un artilugio similar. En el mundo moderno, hacemos que el campo electromagnético que nos rodea realice una enorme cantidad de trabajo: iluminar nuestro entorno, enviar señales a nuestros teléfonos móviles y ordenadores inalámbricos, y calentar nuestra comida. En todos los casos, se trata de cargas en movimiento que producen perturbaciones que se propagan por el campo. De lo cual, por cierto, Hertz no predijo absolutamente nada. A la pregunta de para qué podría utilizarse en última instancia su aparato de detección de ondas, respondió: «No tiene ninguna utilidad en absoluto». Cuando le insistieron para que ofreciera alguna aplicación práctica, dijo: «Creo que nada». Algo a tener en cuenta a la hora de valorar las posibles aplicaciones de la investigación básica.

ONDAS DE GRAVEDAD

Solo cuando los físicos comprendieron la relación entre el electromagnetismo y la luz comenzaron a preguntarse sobre la posibilidad de que un fenómeno similar se produjese con la gravedad. Podría parecer una cuestión académica, puesto que se necesita un objeto del tamaño de un planeta o una luna para crear un campo gravitatorio de intensidad medible. Tampoco es que podamos agitar la Tierra una y otra vez para crear ondas. Pero para el universo eso no es ningún problema. Nuestra galaxia está repleta de estrellas binarias, sistemas en los que dos estrellas orbitan una alrededor de la otra, que presumiblemente agitan el campo gravitatorio al hacerlo. ¿Produce eso ondas que se propagan en todas direcciones?

Curiosamente, la gravedad tal y como la describieron Newton o Laplace no prediría ningún tipo de radiación. Cuando un planeta o una estrella se mueve, la

teoría dice que su fuerza gravitatoria cambia inmediatamente en todo el universo. No es una onda que se propaga, sino una transformación instantánea en todos los lugares.

Este es solo uno de los aspectos en los que la gravedad newtoniana parece no encajar adecuadamente con el cambiante marco de la física que se desarrolló a lo largo del siglo XIX. El electromagnetismo, y en particular el papel central de la velocidad de la luz, fue una inspiración fundamental para Albert Einstein y el resto de quienes desarrollaron la teoría de la relatividad especial en 1905. Según dicha teoría, nada puede viajar más rápido que la luz, ni siquiera hipotéticas alteraciones del campo gravitatorio. Algo no encajaba. Tras diez años de intenso trabajo, Einstein logró construir una teoría de la gravedad totalmente nueva, denominada «relatividad general», que sustituyó por completo a la de Newton.

Igual que la versión de Laplace de la gravedad newtoniana, la relatividad general de Einstein describe la gravedad en función de un campo definido en todos los puntos del espacio. Pero, desde un punto de vista matemático, el campo de Einstein es mucho más complejo e imponente que el de Laplace. En lugar del potencial gravitatorio, definido por un único número en cada punto, Einstein utilizó algo llamado «tensor métrico», que puede entenderse como una serie de diez números independientes en cada punto. Esta complejidad matemática contribuye a la reputación de la relatividad general como una teoría muy difícil de entender. Pero la idea fundamental es sencilla, aunque profunda: la métrica describe la curvatura del propio espacio-tiempo. Según Einstein, la gravedad es una manifestación de la curvatura y el estiramiento del mismísimo tejido del espacio, de la manera en que medimos distancias y tiempos en el universo. Cuando decimos: «El campo gravitatorio es cero», lo que estamos afirmando es que el espacio-tiempo es plano, y que es válida la geometría euclidiana que aprendimos en la escuela.

Una feliz consecuencia de la relatividad general es que, como sucede con el electromagnetismo, las perturbaciones en el campo describen ondas que se

propagan a la velocidad de la luz. Y las hemos detectado, aunque no de manera directa. En 1974, Russell Hulse y Joseph Taylor descubrieron un sistema binario en el que ambos objetos son estrellas de neutrones que giran rápidamente en una órbita muy cerrada. La relatividad general predice que un sistema así debería perder energía mediante la emisión de ondas gravitatorias, lo que haría que el período orbital disminuyese progresivamente a medida que las estrellas se fuesen acercando entre sí. Hulse y Taylor consiguieron medir esta variación del período, que coincidía precisamente con la predicción de Einstein. En 1993 recibieron el premio Nobel por su trabajo.

Eso es medir indirectamente las ondas gravitatorias, en lugar de observar sus efectos directamente en un laboratorio aquí en la Tierra. No es que no lo estemos intentando. Hay varios proyectos en marcha para observar las ondas gravitatorias procedentes de fuentes astrofísicas, normalmente mediante la reflexión de rayos láser en espejos situados a varios kilómetros de distancia. En su avance, una onda gravitatoria estira el espacio-tiempo, haciendo que los espejos se alejen y después se acerquen entre sí. Esto se puede detectar midiendo minúsculas variaciones en el número de longitudes de onda láser que separan los dos espejos. En Estados Unidos, el Observatorio de Ondas Gravitatorias por Interferometría Láser (LIGO, Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory) consta de dos instalaciones separadas, una en el estado de Washington y otra en Luisiana. Colaboran con el observatorio VIRGO, en Italia, y el GEO600, en Alemania. Ninguno de estos laboratorios ha detectado aún ondas gravitatorias, pero los científicos son muy optimistas y creen que las mejoras recientes les permitirán hacer un descubrimiento espectacular. Si esto sucede, será la confirmación palmaria de que la gravedad se comunica a través de un campo dinámico y vibrante.

PARTÍCULAS QUE SURGEN DE LOS CAMPOS

La constatación de que la luz es una onda electromagnética entraba en total contradicción con la teoría de la luz de Newton, según la cual esta estaba compuesta por partículas denominadas «corpúsculos». Ambas posturas contaban con buenos argumentos. Por una parte, la luz proyecta una sombra definida, como cabría esperar de un chorro de partículas, en lugar de doblar las esquinas, como nuestra experiencia con el agua y las ondas sonoras podría llevarnos a pensar. Por la otra, la luz puede crear patrones de interferencia cuando atraviesa aperturas estrechas, como haría una onda. La síntesis electromagnética parecía inclinar la balanza en favor de las ondas.

Conceptualmente, un campo es lo opuesto de una partícula. Una partícula tiene una posición definida en el espacio, mientras que un campo existe en cualquier punto del mismo y está definido por su magnitud, el valor que toma en cada punto, y quizá por otras propiedades, como su dirección. La mecánica cuántica, que surgió en 1900 y llegó a dominar la física del siglo xx, terminó por compaginar ambos conceptos. En resumidas cuentas: todo está compuesto de campos, pero cuando los observamos en detalle lo que vemos son partículas.

Imagine que está al raso en una noche muy oscura, viendo cómo se aleja de usted un amigo que lleva una vela. La luz se va atenuando a medida que aumenta la distancia entre su amigo y usted. Llega un momento en que es tan tenue que ya no la ve. Pero —podría decir— eso es así porque nuestros ojos son unos instrumentos imperfectos. Quizá si tuviésemos una visión perfecta podríamos ver cómo la luz de la vela se va debilitando progresivamente pero sin llegar nunca a desaparecer por completo.

En realidad, no sería eso lo que sucedería. Con una visión perfecta, veríamos durante un tiempo cómo la vela se va atenuando, pero llegaría un momento en que sucedería algo notable. En lugar de volverse gradualmente más mortecina, la luz de la vela comenzaría a titilar, con luminosidad fija cada vez que fuese visible. A medida que su amigo se fuese retirando, aumentaría la proporción de los períodos en que la vela se vería apagada. Llegaría un momento en que la vela

estaría apagada prácticamente todo el tiempo, salvo por muy raros destellos de luz de muy baja intensidad. Esos destellos se deberían a partículas de luz individuales: fotones. El físico David Deutsch comenta este experimento mental en el libro *La estructura de la realidad*, donde señala que la vista de las ranas es mucho mejor que la de los humanos, tanto que son capaces de observar fotones individuales.

La idea de los fotones se remonta a Max Planck y Albert Einstein, a principios del siglo pasado. Planck estaba estudiando la radiación que emiten los objetos cuando se calientan. La teoría ondulatoria de la luz predecía que se emitía mucha más radiación en las longitudes de onda muy cortas, y por tanto energías altas, de la que se observaba en la práctica. Planck propuso una solución brillante y algo desconcertante: que la luz estaba compuesta por paquetes discretos, o cuantos, y que un cuanto de luz con una determinada longitud de onda tendría una energía fija. Se necesita una buena cantidad de energía para crear un solo cuanto de luz de longitud de onda corta, por lo que la idea de Planck permitiría explicar por qué hay mucha menos radiación de la predicha por la teoría ondulatoria en las longitudes de onda cortas.

Esta conexión entre energía y longitud de onda es un concepto clave en mecánica cuántica y en teoría de campos. La longitud de onda no es más que la distancia entre dos picos sucesivos de una onda. Cuando es corta, la onda está muy apretada. Llevarla a ese estado requiere energía, lo que explica por qué los paquetes de luz de Planck tienen alta energía cuando su longitud de onda es corta, como en la luz ultravioleta o los rayos X. Las longitudes de onda largas, como las de las onda de radio, suponen que los cuantos de luz individuales poseen muy poca energía. Una vez que se inventó la mecánica cuántica, esta relación pudo trasladarse también a las partículas con masa. Una masa elevada implica una longitud de onda corta, lo que significa que la partícula ocupa menos espacio. Esa es la razón por la cual son los electrones, no los protones ni los neutrones, los que definen el tamaño de un átomo: son las partículas más ligeras de entre las presentes, por lo que poseen la longitud de onda más larga, y por lo

tanto ocupan más espacio. En cierto sentido, es incluso el motivo por el que el LHC tiene que ser tan enorme. Estamos tratando de observar cosas que suceden a escalas muy reducidas, lo que significa que debemos emplear longitudes de onda muy pequeñas, lo que a su vez implica que necesitamos partículas de alta energía, para lo cual es necesario un acelerador gigante que nos permita acelerarlas lo máximo posible.

Planck no dio el salto de las energías cuantizadas a las partículas de luz en sentido literal. Pensó que su idea era una especie de truco para obtener la solución correcta, pero no un aspecto fundamental del funcionamiento de la realidad. Quien dio ese paso fue Einstein, que estaba tratando de entender algo llamado «efecto fotoeléctrico». Cuando se ilumina un metal con luz intensa, se pueden arrancar electrones de los átomos del metal. Cabría pensar que el número de electrones arrancados dependería de la intensidad de la luz, porque cuanto más intenso es el haz mayor es su energía. Pero eso no es del todo correcto. Cuando es luz de longitud de onda larga, ni siquiera una fuente de alta intensidad es capaz de arrancar ningún electrón, mientras que la luz de longitud de onda corta puede hacerlo incluso cuando es muy tenue. Einstein se dio cuenta de que el efecto fotoeléctrico se podía explicar si asumimos que toda la luz, no solo la que emiten los cuerpos incandescentes, está compuesta por cuantos discretos, en lugar de ser una onda continua. «Alta intensidad pero longitud de onda larga» equivale a un bombardeo de cuantos, pero cada uno de ellos con una energía demasiado pequeña como para poder separar ningún electrón. «Baja intensidad pero longitud de onda corta» implica solo unos pocos cuantos, cada uno de los cuales posee no obstante energía suficiente para hacerlo.

Ni Planck ni Einstein emplearon el término «fotón», que fue acuñado por Gilbert Lewis en los años veinte, y popularizado por Arthur Compton. Fue este quien finalmente convenció al gran público de que la luz estaba compuesta por partículas, al demostrar que los cuantos de luz, además de energía, poseían momento.

El artículo de Einstein sobre el efecto fotoeléctrico fue el trabajo por el que

acabaría recibiendo el premio Nobel. En el mismo número de la revista en la que apareció, en 1905, figuraba otro artículo suyo: en él formulaba la teoría de la relatividad general. Así era la vida de Einstein en 1905: publicó un artículo revolucionario que establecía las bases de la mecánica cuántica, y por el que más adelante obtendría el premio Nobel, y no era más que el segundo artículo más importante de los que publicó en ese número de la revista.

IMPLICACIONES CUÁNTICAS

La mecánica cuántica pilló por sorpresa a los físicos de las primeras décadas del siglo xx. Siguiendo los pasos de Planck y Einstein, trataron de entender el comportamiento de los fotones y los átomos, y para cuando lo lograron habían dado un vuelco a la segura visión del mundo de Newton. Ha habido muchas revoluciones en la física, pero dos destacan por encima del resto: el momento en el que Newton compuso su gran visión de la mecánica «clásica» en el siglo xvii, y aquel en el que un grupo de brillantes científicos trabajaron conjuntamente para sustituir la teoría de Newton por la de la mecánica cuántica.

La mayor diferencia entre el mundo cuántico y el clásico radica en la relación entre lo que «existe realmente» y lo que podemos observar en la práctica. Por descontado, toda medición en el mundo real está sujeta a la imprecisión de nuestros aparatos de medida, pero en la mecánica clásica podemos al menos imaginarnos que, si extremásemos el cuidado, seríamos capaces de estrechar al máximo la diferencia entre medición y realidad. La mecánica cuántica nos niega tal posibilidad, ni siquiera en principio. En el mundo cuántico, lo que podemos llegar a observar es tan solo un pequeño subconjunto de lo que existe realmente.

Para ilustrar la idea, valga esta torpe analogía. Imagine que tiene una amiga que es muy fotogénica, pero nota algo extraño en las fotos en las que ella aparece: siempre sale exactamente de perfil, ya sea mostrando su lado izquierdo

o el derecho, pero nunca de frente ni de espaldas. Cuando la ve desde un lado y le hace una fotografía, la imagen siempre sale correctamente desde ese lado. Pero cuando la ve directamente de frente y le hace la foto, la mitad de las veces aparece con su perfil derecho y la mitad con el izquierdo. (Las condiciones de la analogía dictan que «hacer una fotografía» es equivalente a «realizar una observación cuántica».) Puede hacer una fotografía desde un cierto ángulo y después moverse muy rápido para hacer otra formando un ángulo de noventa grados con la primera, pero siempre la sacará de perfil. Esta es la esencia de la mecánica cuántica: nuestra amiga puede estar orientada en cualquier dirección, pero cuando le hacemos una foto solo vemos uno de entre dos ángulos posibles. Esta es una buena analogía para el «espín» de un electrón en la mecánica cuántica, una propiedad cuya medición siempre da como resultado un valor en el sentido de las agujas del reloj o en el sentido contrario, sea cual sea el eje que tomemos como referencia.

El mismo principio se aplica a otras magnitudes observables. Piense en la posición de una partícula. En mecánica clásica, existe algo denominado «posición de la partícula», y podemos medirlo. En mecánica cuántica no existe tal cosa. En cambio, hay algo llamado «función de onda» de la partícula, un conjunto de números que denotan la probabilidad de observar la partícula en cualquier lugar determinado cuando la buscamos ahí. No existe algo como «el lugar en el que realmente se encuentra la partícula», pero cuando miramos siempre la encontramos en algún lugar en particular.

Cuando se aplica la mecánica cuántica a los campos, se llega a la «teoría cuántica de campos», que es la base de la explicación moderna de la realidad al nivel más fundamental. De acuerdo con la teoría cuántica de campos, cuando observamos un campo con el suficiente detalle vemos que está compuesto por partículas individuales, aunque el campo en sí es real. (En realidad, el campo tiene asociada una función de onda que describe la probabilidad de que tome un determinado valor en cada punto del espacio.) Imagine un televisor o el monitor de un ordenador, cuya imagen, desde una cierta distancia, parece continua, pero

que de cerca vemos que en realidad está compuesta por un conjunto de píxeles diminutos. Así pues, en un televisor cuántico, la imagen continua existe realmente, pero cuando la miramos de cerca solo podemos verla como píxeles.

La teoría cuántica de campos es la responsable del fenómeno de las partículas virtuales, incluidos los partones (quarks y gluones) en el interior de los protones que tan importantes son para lo que sucede en las colisiones del LHC. Igual que nunca podemos determinar la posición precisa de una partícula, tampoco podemos establecer con precisión la configuración de un campo. Si lo observamos con suficiente detenimiento, vemos partículas que aparecen y desaparecen en el espacio vacío, dependiendo de las condiciones locales. Las partículas virtuales son una consecuencia directa de la indeterminación inherente a las mediciones cuánticas.

Durante generaciones, los estudiantes de física han tenido que enfrentarse a una temida pregunta: «¿La materia en realidad está hecha de partículas o de ondas?». Es habitual que ni siquiera tras todos sus años de formación lleguen a tener una buena respuesta. He aquí: la materia en realidad son ondas (campos cuánticos), pero cuando la observamos con el suficiente detalle vemos partículas. Si nuestros ojos fuesen tan sensibles como los de las ranas, todo esto tendría más sentido para nosotros.

MATERIA QUE SURGE DE LOS CAMPOS

De modo que la luz es una onda, un conjunto de perturbaciones que se propagan en el campo electromagnético que se extiende por todo el espacio. Cuando incorporamos la mecánica cuántica, llegamos a la teoría cuántica de campos, que dice que cuando observamos un campo electromagnético de cerca lo vemos como partículas individuales. La misma lógica se aplica a la gravedad: está descrita por un campo, existen ondas gravitatorias que se mueven por el espacio a la velocidad de la luz y si observásemos una onda con suficiente detalle la

veríamos como un conjunto de partículas sin masa denominadas «gravitones». La gravedad es demasiado débil como para que podamos soñar con detectar los gravitones individuales, pero las reglas básicas de la mecánica cuántica afirman que deben existir. De manera análoga, la fuerza nuclear fuerte se propaga gracias a un campo, que observamos en forma de partículas denominadas «gluones», y lo mismo sucede con la fuerza nuclear débil y los bosones W y Z.

Todo en orden. Una vez que hemos entendido que las fuerzas surgen de campos que se extienden por el espacio, y que la mecánica cuántica hace que los campos se vean como partículas, ya podemos hacernos una idea bastante buena de cómo funcionan las fuerzas de la naturaleza. Pero ¿y la materia sobre la que dichas fuerzas operan? Una cosa es pensar que la gravedad o el magnetismo surgen de un campo, y otra muy distinta suponer que los propios átomos están asociados a campos. Si hay algo que ciertamente es una partícula, y no un campo, es uno de sus diminutos electrones que orbitan alrededor de los átomos, ¿no es cierto?

Pues no lo es. Igual que las transmisoras de las fuerzas, las partículas de materia también surgen al aplicar las reglas de la mecánica cuántica a un campo que se extiende por todo el espacio. Como ya he comentado, las partículas transmisoras son bosones, mientras que las que componen la materia son fermiones. Se corresponden con distintos tipos de campos, pero campos al fin y al cabo.

Los bosones se pueden apilar unos encima de otros, mientras que los fermiones ocupan espacio. Veámoslo desde el punto de vista de los campos de los que estas partículas son vibraciones. La diferencia entonces estriba en una sencilla distinción: los campos bosónicos pueden tomar cualquier valor, mientras que cada posible frecuencia de vibración de un campo fermiónico toma el valor «encendida» o «apagada», de una vez por todas. Cuando el valor de un campo bosónico como el electromagnético es realmente grande, eso se corresponde con una cantidad enorme de partículas; y cuando el valor es pequeño, pero distinto de cero, el número de partículas es también pequeño. Para los campos

fermiónicos no existen estas posibilidades. O bien hay una partícula (en un estado determinado) o bien no la hay. Esta característica fundamental es lo que se conoce como el «principio de exclusión de Pauli»: dos fermiones no pueden existir en el mismo estado. Para definir el «estado» de una partícula, tenemos que saber dónde está, qué energía posee, y quizá otras propiedades, como de qué manera está girando. El principio de exclusión de Pauli básicamente dice que no es posible tener dos fermiones idénticos que hagan exactamente lo mismo precisamente en el mismo lugar.

TRANSFERIR VIBRACIONES

La idea de que las partículas de materia son vibraciones discretas de los campos fermiónicos explica características del mundo real que de otra manera resultarían desconcertantes, como la manera en que se pueden crear y destruir partículas. En los primeros días de la mecánica cuántica, los físicos tenían dificultades para comprender el fenómeno de la radiactividad. Entendían cómo se podían crear fotones a partir de otras partículas, porque no eran más que vibraciones del campo electromagnético, pero ¿qué pasaba en los procesos radiactivos, como la desintegración del neutrón? Dentro de un núcleo, apiñado en estrecha compañía con unos cuantos protones, un neutrón pervive indefinidamente. Sin embargo, cuando se encuentra aislado un neutrón decae en cuestión de minutos y se transforma en un protón mediante la emisión de un electrón y un antineutrino. La pregunta es: ¿de dónde salen el electrón y el antineutrino? En aquel entonces se especulaba con que en realidad habían estado todo el tiempo escondidos dentro del neutrón, pero eso no parecía del todo correcto.

En 1934, Enrico Fermi ofreció una hermosa respuesta, en lo que constituye la primera aplicación real de la teoría de campos a los fermiones (lo cual fue del todo apropiado, porque es a Fermi a quien esas partículas deben su nombre). Fermi propuso que se podía ver cada una de esas partículas como vibraciones de

distintos campos cuánticos, y que cada campo ejercía una minúscula influencia sobre los demás, como un piano en una habitación puede hacer que las cuerdas de otro piano en la habitación contigua resuenen suavemente en simpatía. No es que las nuevas partículas se creasen de la nada por arte de magia, sino que las vibraciones en el campo del neutrón se transfieren gradualmente a los campos del protón, el electrón y el antineutrino. Como es mecánica cuántica, no podemos percibir la transferencia gradual: si observamos el neutrón, o bien lo vemos como neutrón, o bien vemos que se ha desintegrado, con una probabilidad que podemos calcular matemáticamente.

La teoría cuántica de campos también permite entender cómo una partícula puede convertirse en otras con las que ni siquiera interactúa directamente. Un clásico ejemplo, que tendrá mucha importancia para nosotros enseguida, es el de un bosón de Higgs que se desintegra en dos fotones. Suena sorprendente, porque sabemos que los fotones no se acoplan directamente con el bosón de Higgs. Los fotones se acoplan con las partículas cargadas, y el Higgs lo hace con las partículas con masa. Y ni el Higgs está cargado ni los fotones poseen masa.

La clave está en el concepto de las partículas virtuales, que realmente se deberían enseñar como campos virtuales. Un bosón de Higgs se acerca como una onda que vibra en el campo de Higgs. Esa vibración puede provocar vibraciones en las partículas con masa con las que el Higgs se acopla. Pero puede que dichas vibraciones no alcancen el nivel necesario para que aparezcan en forma de nuevas partículas; sin embargo, sí pueden a su vez dar lugar a vibraciones en otro campo distinto, en este caso el electromagnético. Así es como un Higgs puede convertirse en fotones: primero se transforma en partículas virtuales cargadas y con masa, que rápidamente se convierten a su vez en fotones. Es como si tuviésemos dos pianos desafinados por completo el uno respecto al otro, que normalmente no resonarían en absoluto. Pero en la habitación hay un tercer instrumento, por ejemplo un violín, con la suficiente flexibilidad como para resonar con ambos.

LEYES DE CONSERVACIÓN

Puesto que todas las partículas surgen a partir de campos, incluso las partículas de materia pueden aparecer y desaparecer en la naturaleza. Pero eso no sucede de manera totalmente caótica. Suma la carga eléctrica antes y después de que un neutrón se desintegre. Antes es cero, porque solo tenemos un neutrón sin carga. Después también es cero: el protón tiene carga positiva, pero el electrón tiene precisamente la misma carga aunque de signo negativo y el antineutrino no posee carga alguna. También parece que el número de quarks es el mismo antes y después, ya que un único neutrón ha dado lugar a un solo protón. Por último, el número de leptones es exactamente uno tanto antes como después, si incorporamos el truco de contar los leptones de antimateria como «menos un leptón» (y los antiquarks como «menos un quark», en caso de que los hubiese). Así, el neutrón tiene tres quarks y cero leptones, y los productos de su desintegración suman también tres quarks (el protón) y cero leptones (uno para el electrón y menos uno para el antineutrino). Ese es el motivo por el que sabemos que en la desintegración de los neutrones se produce un antineutrino, y no un neutrino.

Estos patrones son leyes de conservación: reglas inquebrantables que gobiernan las interacciones entre partículas permitidas en la naturaleza. Junto con la famosa ley de conservación de la energía, también tenemos la conservación de la carga eléctrica, del número de quarks y del número de leptones. Algunas leyes de conservación son más inviolables que otras: algunos físicos sospechan que los números de quarks y leptones pueden variar en algunas ocasiones (muy rara vez, o en condiciones extremas), pero la mayoría creen que la energía y la carga eléctrica están absolutamente fijadas.

Teniendo estas reglas en mente, podemos entender qué partículas se desintegran y cuáles perviven para siempre. La regla básica es que las partículas pesadas tienden a desintegrarse en otras más ligeras, siempre que el proceso no

viola ninguna ley de conservación. Como la carga eléctrica se conserva, y los electrones son las partículas cargadas más ligeras, son completamente estables. Puesto que el número de quarks se conserva, y el protón es la más ligera de las partículas con número de quarks distinto de cero, también es estable (hasta donde sabemos). Los neutrones no lo son, pero pueden formar núcleos estables en compañía de protones.

El bosón de Higgs, una partícula muy pesada y sin carga eléctrica que no es ni un quark ni un leptón, se desintegra extremadamente rápido, tanto que nunca la observaremos directamente en un detector de partículas. Esa es una de las razones por las que ha sido tan difícil encontrarla, y por la que nuestro aparente éxito ha sido tan satisfactorio.

A través de un espejo roto

Donde estudiamos a fondo el bosón de Higgs y el campo del que surge, y demostramos cómo rompe simetrías y le da personalidad al universo.

En una sala de seminarios vacía en el Instituto Tecnológico de California, yo estaba sentado a un lado de la mesa y Hal Eisner, periodista de la televisión local, estaba frente a mí. Entre ambos, un enorme cubo de palomitas de maíz. Eisner tomó una palomita y la agitó ante mis narices, pidiéndome —rogándome, de hecho— que la utilizase para explicar el bosón de Higgs. «Si no hubiese bosón de Higgs, ¿esta palomita explotaría? Lo haría, ¿verdad?»

Era el 10 de septiembre de 2008, el día en que los primeros protones circularon por el LHC. Para la generación anterior de aceleradores, el momento de la puesta en marcha había sido un acto discreto, al que solo había prestado atención un pequeño grupo de físicos interesados, y que el resto del mundo había ignorado. Pero el LHC es especial, y la atención de personas de todo el mundo estaba centrada en un puñado de protones que estaba cogiendo fuerzas para recorrer por primera vez los veintisiete kilómetros del anillo.

Por ese motivo, los periodistas no tuvieron más remedio que venir a Caltech, y a otras universidades en otras ciudades, para informar sobre la emoción del momento. En Ginebra era pronto por la mañana, pero hay nueve horas de diferencia con California, así que para nosotros aún era la última hora de la noche anterior. Las pantallas de los ordenadores estaban preparadas para que todo el mundo pudiese seguir el acontecimiento, aunque la sobrecarga de los servidores del CERN hizo que enseguida se cortase la emisión por internet.

Alguien pidió pizza y la repartió, lo que contribuyó a que los científicos estuviesen a gusto. (Una proporción importante de los átomos del cuerpo del físico medio tuvieron previamente la forma de una pizza.)

Aun así, la gente del noticiero local insistía en preguntar, con toda la razón, a qué venía tanto lío. Sabemos que es importante, pero ¿por qué, exactamente? La búsqueda del bosón de Higgs siempre era una de las primeras respuestas que recibían. Vale, ¿y por qué es tan importante el Higgs? Algo relacionado con la masa y con la ruptura de simetrías. Llémoslo al terreno de lo concreto: ¿explotaría esta palomita?

La respuesta correcta es: «Sí, si el bosón de Higgs (o, siendo más precisos, el campo de Higgs en el cual el bosón es una onda que se propaga) desapareciese de pronto; la materia ordinaria dejaría de mantenerse unida y los objetos como esta palomita de maíz explotarían de inmediato». Pero es engañoso imaginar que el Higgs es una especie de fuerza que mantiene los átomos unidos. El Higgs es un campo que se extiende por todo el espacio, dándoles peso a las partículas como los electrones, permitiendo que formen átomos, que se unen para crear moléculas. Sin el Higgs no habría átomos, solo habría un montón de partículas moviéndose por separado a toda velocidad a lo largo y ancho del universo.

Es un problema habitual a la hora de trasladar conceptos profundos de la física moderna al lenguaje de la vida cotidiana. Uno quiere decir cosas que sean absolutamente correctas (por supuesto), pero también quiere que la gente se lleve la impresión correcta, que no es lo mismo: de nada sirve decir cosas correctas si nadie tiene ni idea de qué estás hablando o, aún peor, si tu explicación puede llevarles a pensar algo erróneo.

Por suerte para nosotros, en realidad no es tan difícil entender lo que sucede. El campo de Higgs es como el aire, o como el agua para los peces en el mar: normalmente no nos damos cuenta de que está ahí, pero lo tenemos a nuestro alrededor, y sin él la vida sería imposible. Y está literalmente «a nuestro alrededor»: a diferencia de otros campos de la naturaleza, el de Higgs tiene un valor no nulo incluso en el espacio vacío. Al movernos por el mundo, estamos

inmersos en un campo de Higgs, y es la influencia de dicho campo sobre nuestras partículas la causante de sus particulares propiedades.

El bosón de Higgs no es una partícula cualquiera. Cuando el Tevatrón del Fermilab descubrió el quark top en 1995, fue un asombroso logro de trabajo e ingenio. Pero ya estábamos acostumbrados a los quarks y en realidad no esperábamos descubrir nada verdaderamente sorprendente. El Higgs es más que eso: no hemos encontrado ninguna otra partícula parecida. Su campo se extiende por todo el espacio, rompe simetrías y proporciona masa e individualidad a las demás partículas del Modelo Estándar. Si los quarks top y bottom no existiesen, nuestras vidas no sufrirían prácticamente ninguna alteración. Si el Higgs no existiese, el universo sería un lugar completamente diferente.

UNA ANALOGÍA MERECEDORA DE UN PREMIO

En 1993, el LHC aún no pasaba de ser una idea en una pizarra, y no era nada seguro que acabase convirtiéndose en realidad. Un grupo de físicos del CERN estaban presentando el gran proyecto a William Waldegrave, ministro de Ciencia del Reino Unido por aquel entonces. A Waldegrave le interesaba la idea, pero no conseguía captar el argumento principal de la propuesta: el concepto del bosón de Higgs. «No entendió ni una palabra de lo que se dijo allí», recuerda el físico David Miller, de la University College de Londres.

Pero Waldegrave no se dio por vencido, sino que retó a los científicos a que le ofreciesen una explicación comprensible del papel del bosón de Higgs que cupiese en un solo folio. A cambio, ofreció una botella de buen champán a quien tuviese la mejor explicación. Miller y cuatro colegas fueron capaces de pergeñar una atractiva metáfora que consideraron digna de la atención del ministro de Ciencia. Los cinco recibieron sus botellas de champán y, evidentemente, el Reino Unido apoyó el LHC.

He aquí una versión actualizada de la analogía de Miller. Imagine que

Angelina Jolie y yo atravesamos una habitación vacía. (En la explicación original, Margaret Thatcher ocupaba el lugar de la estrella de cine, por razones políticas evidentes, pero lo único importante es que sea alguien famoso.) Para los fines del experimento mental, supongamos que la velocidad a la que ambos caminamos de manera natural es la misma. En ese caso, cruzaríamos la habitación en el mismo tiempo. Existe una simetría: da igual que sea Angelina o yo quien está atravesando la habitación, el tiempo transcurrido será el mismo.

Ahora imagine que hay una fiesta, y que la habitación está repleta de juerguistas con ganas de charlar. Yo camino a través de la habitación, puede que algo más despacio que cuando estaba vacía: tengo que detenerme brevemente y adaptar mis pasos para sortear a todos los asistentes, pero en general paso desapercibido. Cuando Angelina atraviesa esa misma habitación, la historia es completamente diferente. A medida que camina, todo el mundo hace que se detenga al acercársele a pedirle un autógrafo, a hacerse una foto con ella o simplemente a saludarla. En la práctica, su «masa» es mayor: le cuesta más esfuerzo conseguir moverse y cruzar la habitación a ella que a mí. (No estoy diciendo que Angelina Jolie esté gorda, es solo una metáfora.) La simetría que antes teníamos se ha roto por la presencia en la habitación de las otras personas.

Un físico diría que Angelina Jolie «interactúa con mayor intensidad» con los asistentes a la fiesta que yo. La intensidad de la interacción es un reflejo de su mayor fama. Nadie se plantea pararme y pedirme un autógrafo, pero una actriz famosa sufre interacciones frecuentes con la multitud que la rodea.

Ahora ponga un quark up en mi lugar, un quark top en el lugar de Angelina, y el campo de Higgs en el de los asistentes a la fiesta. Si no existe un campo de Higgs que ocupe el espacio, la simetría entre el quark up y el top es perfecta, y se comportan de la misma manera, igual que Angelina y yo atravesamos la habitación vacía a la misma velocidad. Pero un quark top interactúa más intensamente con el Higgs de lo que lo hace un quark up. Si el campo de Higgs se «pone en funcionamiento», el top acaba con una masa mayor, y cuesta más hacer que se mueva, como le resulta más trabajoso a Angelina abrirse camino

entre la concurrencia que a mí.

Como sucede con cualquier analogía, esta no es perfecta. Como una multitud de asistentes a la fiesta, el campo de Higgs ocupa todo el espacio y afecta a todo lo que se mueva a través de él. Pero, a diferencia de la multitud de personas, o de cualquier otra cosa a la que estemos acostumbrados, no puedo medir mi velocidad respecto a este campo que nos rodea. Su aspecto no varía en absoluto, con independencia de cómo me esté moviendo yo. Es necesario un esfuerzo mayor para poner una partícula en movimiento en presencia del campo de Higgs, pero una vez que se mueve sigue haciéndolo, como Galileo, Newton o Einstein habrían esperado. El campo de Higgs no te arrastra hasta hacer que te muevas a su velocidad, porque no tiene velocidad. En realidad no existe una analogía para esto en nuestra vida cotidiana, pero así es como parece que funciona el mundo.

Antes de que apareciesen Einstein y la relatividad, muchos físicos pensaban que las ondas electromagnéticas eran vibraciones de un medio llamado «éter». Incluso trataron de detectarlo buscando variaciones en la velocidad de la luz en función del movimiento de la Tierra: si la luz viajaba en la misma dirección que el éter, debería moverse más rápido; y más despacio al ir en dirección contraria a él. Pero no encontraron ninguna prueba de ello. La genialidad de Einstein consistió en darse cuenta de que la mera idea del éter era innecesaria, y de que la velocidad de la luz es absolutamente constante en el espacio vacío. No hace falta un campo de éter sobre el que sustentar el campo electromagnético; este puede existir sin más.

Es tentador pensar en el campo de Higgs como algo parecido al éter: un campo invisible a través del cual se mueven ondas, compuestas de bosones de Higgs en lugar de radiación electromagnética. No es completamente erróneo, ya que el campo de Higgs se extiende por todo el espacio, y los bosones de Higgs son vibraciones en su seno. Pero es preferible resistirse a la tentación. Lo fundamental del éter era que tenía importancia la velocidad a la que algo se movía dentro de él (que definía un estado de reposo para el espacio vacío), mientras que con el campo de Higgs eso no implica diferencia alguna. La

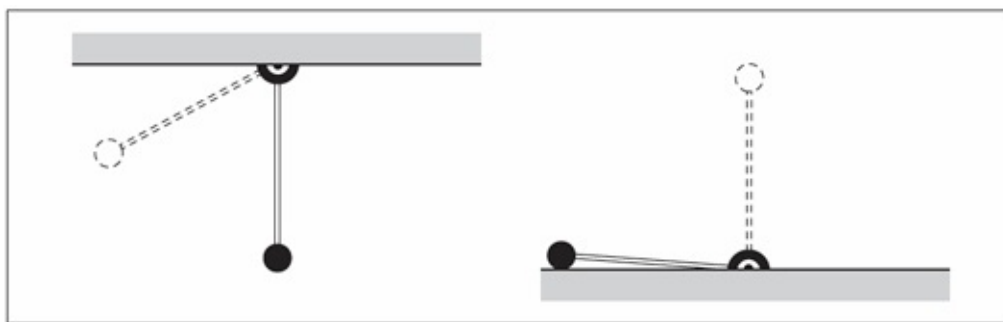
relatividad sigue siendo válida.

DESPLAZADO RESPECTO AL CERO

Como hemos visto en el capítulo anterior, el universo está formado por campos. Pero la mayoría de estos campos están apagados —su valor es cero— en el espacio vacío. Una partícula es una pequeña vibración en un campo, un paquete de energía que se crea cuando se desplaza el campo respecto a su valor natural. El Higgs es distinto: no se anula ni siquiera en el espacio vacío. El campo toma un determinado valor constante absolutamente en todos los puntos y la partícula del bosón de Higgs es una vibración alrededor de dicho valor, no alrededor del cero. ¿Qué hace que el Higgs sea tan especial?

La clave está en la energía. Imagine una pelota en lo alto de una colina. Tiene lo que los físicos llaman «energía potencial»: no hace nada, está tranquilamente en reposo, pero tiene el potencial de liberar energía si dejamos que baje rodando por la pendiente. Cuando eso sucede, gana velocidad y va convirtiendo gradualmente su energía potencial en energía de movimiento. Pero también, al moverse, choca con las piedras, siente la resistencia del aire y hace ruido, todo lo cual hace que se disipe energía en su recorrido. Cuando llega a la base de la colina, su energía original se ha convertido en sonido y calor, y la pelota puede volver al reposo.

Los campos son algo parecido. Cuando los desplazamos de su estado de reposo preferido, hacemos que ganen energía potencial. Si los soltamos, empiezan a vibrar y pueden acabar disipando su energía al transferírsela a otros campos. En algún momento volverán al estado de reposo. Lo que hace que el campo de Higgs sea tan especial es que su estado de reposo no se encuentra en el cero: en su estado de menor energía, el campo se queda anclado en los 246 GeV, un valor que conocemos gracias a los experimentos y que determina la intensidad de las interacciones débiles.



Un campo normal es como un péndulo que cuelga del techo. Alcanza su menor energía posible cuando apunta directamente hacia abajo. Podemos elevarlo, pero para eso hace falta energía. El campo de Higgs es como un péndulo invertido, sujeto al suelo en lugar de estar colgado del techo. Ahora haría falta energía para colocarlo en posición vertical. Su estado de máxima energía se alcanza cuando el péndulo reposa sobre el suelo, ya sea a la izquierda o a la derecha.

Esta cifra de 246 GeV no es la de la masa del bosón de Higgs (que es de unos 125 GeV, y que desconocíamos hasta que el LHC lo encontró), sino el valor del campo en el espacio vacío. A los físicos de partículas les gusta medirlo todo en las mismas unidades, GeV, lo que puede llevar a confusión. La masa del bosón de Higgs nos dice cuánta fuerza se necesita para ponerlo en movimiento, igual que la masa de cualquier otro objeto. Dicho de otra manera, es la cantidad de energía que debemos proporcionar a una vibración del campo antes de que se nos muestre como una partícula discreta. El valor del campo es algo completamente distinto, que caracteriza cómo se comporta cuando se encuentra en reposo absoluto.

Para hacernos una idea de por qué el campo de Higgs se estabiliza cerca de los 246 GeV, y no del cero, pensemos en un péndulo que cuelga del techo. Este péndulo se comporta como un campo normal: su estado de mínima energía es aquel en el que se encuentra en posición vertical, en la parte más baja de su arco. Podemos proporcionarle energía si lo desplazamos de esa posición. Si después lo soltamos, empezará a oscilar de un lado a otro, para acabar deteniéndose una vez

que haya perdido toda esa energía debido a la resistencia del aire y al rozamiento.

Ahora imagine un péndulo invertido, cuyo pivote está fijado al suelo en lugar de al techo. Básicamente, el mecanismo es el mismo, pero se comporta de una manera completamente distinta. El péndulo invertido posee energía cuando está en posición vertical, que antes era su configuración de mínima energía. Ahora son dos las posibilidades de menor energía: cuando el péndulo está en el suelo, a la izquierda o a la derecha del pivote. Si lo dejamos a su suerte, el péndulo se quedará en el suelo, ya sea a la izquierda o a la derecha.

El campo de Higgs se parece al péndulo invertido porque necesita energía para mantenerse en el cero. Su estado de mínima energía es uno en que el campo toma un valor fijo en todos los puntos, igual que el péndulo en reposo se encuentra a cierta distancia del pivote, a la izquierda o a la derecha. Ese es el motivo por el que todo el espacio vacío está ocupado por el campo de Higgs, a través del cual las demás partículas se mueven y adquieren masa: porque esa es la configuración de menor energía. El valor del campo es como el desplazamiento del péndulo respecto a la vertical. Un campo normal tiende a estar en el cero, mientras que el de Higgs se inclina por tomar un valor no nulo, igual que el péndulo busca acabar a la izquierda o a la derecha del pivote.

Por supuesto, podemos preguntarnos por qué el péndulo de Higgs de nuestra metáfora está invertido, en lugar de tomar la posición normal. La respuesta es que nadie lo sabe. Algunas de las posibles explicaciones se basan en una física que va mucho más allá del Modelo Estándar, pero con nuestro grado de conocimiento actual solo podemos decir que es un dato experimental del universo. No tiene nada de malo que el campo de Higgs tome un valor no nulo en el espacio vacío: era una de las posibilidades, y resulta ser la que de hecho se da. Y tiene algo de bueno, porque si no el mundo sería mucho más aburrido (y no solo para los físicos de partículas).

PROPORCIONANDO MASA A LAS PARTÍCULAS

Si el campo de Higgs no interactuase con otras partículas, el hecho de que se extienda por todo el espacio vacío no tendría ninguna importancia (de hecho, ni siquiera lo notaríamos). El efecto más evidente de esta interacción es que «les proporciona masa» a las partículas elementales del Modelo Estándar. Pero este concepto es tan sutil que merece la pena que nos detengamos un momento a explicarlo. En el apéndice 1 puede encontrar más detalles al respecto.

Lo primero que debemos explicar es qué es la «masa» de un objeto. Probablemente, la mejor manera de entenderla es como «el grado de resistencia que uno encuentra cuando empuja el objeto», que es otra manera de decir «la cantidad de energía que se necesita para que el objeto se mueva a una determinada velocidad». Un coche posee una masa mucho mayor que la de una bicicleta, lo sabemos porque hace falta mucho más trabajo para mover el coche que la bicicleta. Otra definición podría ser «la cantidad de energía que posee un objeto cuando está en reposo». Se llega a ella deshaciendo el camino que conduce a la ecuación $E = mc^2$ de Einstein. Solemos pensar que esta ecuación nos dice cuánta energía se acumula en un objeto de una determinada masa, pero igualmente podemos entenderla como la definición de la masa de un objeto que no se mueve.

Es importante recalcar que la masa no está en modo alguno directamente relacionada con la gravedad. Tenemos tendencia a asociarlas, porque la manera más fácil de medir la masa de algo es poniéndolo en una báscula y pesándolo, y todos sabemos que es la gravedad la que tira del objeto hacia abajo. En el espacio vacío, donde la gravedad es irrelevante, los objetos carecen de peso pero no dejan de tener masa. Es más difícil poner en movimiento un enorme cohete que un diminuto guijarro, y aún sería más difícil hacer que se moviese la Luna o un planeta. La gravedad es otra cosa, que afecta a todas las formas de energía, incluso a aquellas que carecen de masa. La luz, que está compuesta por fotones sin masa, se ve sin duda afectada por la gravedad, como queda claramente de

manifiesto en el fenómeno de las lentes gravitatorias (la desviación de los rayos de luz) por parte de las galaxias y de la materia oscura que existe en el universo.

Si echa un vistazo a la tabla con el zoo de partículas en el apéndice 2, verá que algunas tienen masa y otras no. Entre los bosones que transmiten las fuerzas, los gluones, el gravitón y el fotón carecen de masa, mientras que los bosones W y Z sí son masivos, como también lo es el propio bosón de Higgs. Entre los fermiones, observamos que las masas de los neutrinos figuran como «pequeñas», mientras que las de los quarks y los leptones con carga poseen valores específicos.

Esta caótica situación se debe en última instancia a la influencia del campo de Higgs. La regla es sencilla: si no interactúa directamente con el Higgs, no tiene masa; en caso de que sí lo haga, su masa es no nula, y su valor es directamente proporcional a la intensidad de dicha interacción. Las partículas como el electrón y los quarks up y down interactúan con el Higgs con una intensidad relativamente débil, por lo que sus masas son pequeñas; el leptón tau y los quarks top y bottom lo hacen con mayor intensidad, de manera que sus masas son relativamente grandes. (Los neutrinos son un caso aparte: sus masas son minúsculas, pero nuestra comprensión sobre el origen de dichas masas aún dista de ser definitiva. En este libro por lo general las ignoraremos y nos limitaremos a las partes del Modelo Estándar que sí entendemos.)

Si el Higgs fuese como otros campos, y su valor en reposo en el espacio vacío fuese cero, la intensidad de su interacción con otras partículas simplemente mediría la probabilidad de que el bosón de Higgs interactuase con dichas partículas si sus trayectorias se cruzasen. En la mayoría de las ocasiones, un Higgs y un electrón pasarían el uno junto al otro sin perturbarse, mientras que un Higgs y un quark top se dispersarían con mucha intensidad. (Yo puedo cruzarme con desconocidos por la calle sin que me molesten, pero a Angelina Jolie la pararían cada dos por tres.) Pero como su valor esperado no es cero, es como si las demás partículas interactuasen con él continuamente. Y son esas interacciones persistentes e inevitables con el ambiente las que producen la masa

de la partícula. Cuando una partícula interactúa intensamente con el Higgs, es como si llevase a cuestas una multitud de Higgs allá donde vaya, lo que contribuye a su masa.

La fórmula para la masa de una partícula es muy sencilla: es el valor del campo de Higgs en el espacio vacío multiplicado por la intensidad de interacción específica de dicha partícula con el Higgs. ¿Por qué hay algunas partículas, como el quark top, que interactúan intensamente con el Higgs, mientras otras, como el electrón, lo hacen de forma relativamente débil? ¿Cómo se explican los números concretos? Nadie lo sabe. A día de hoy, son preguntas sin respuesta. Con nuestro conocimiento actual, tratamos esas intensidades de acoplamiento como constantes de la naturaleza que no tenemos más remedio que medir experimentalmente. Estudiando el propio Higgs esperamos encontrar alguna pista, y este es uno de los motivos por los que el LHC es tan importante.

UN MUNDO SIN HIGGS

A pesar de todo lo anterior, es engañosamente impreciso decir: «El Higgs es responsable de la masa», como los físicos hacemos en ocasiones. Recuerde que no vemos los quarks directamente: están confinados, junto con los gluones, en el interior de hadrones como los protones y los neutrones. La masa de un protón o de un neutrón es mucho mayor que la suma de las de los quarks que lo componen, debido a que procede, en su mayor parte, de las partículas virtuales que mantienen unidos los quarks. Si no existiese el Higgs, los quarks seguirían unidos formando hadrones, cuyas masas apenas variarían. Eso significa que la mayor parte de la masa de, por ejemplo, una mesa o una persona, no se debe en absoluto al Higgs. La mayor parte de la masa de los objetos ordinarios proviene de sus protones y neutrones, la cual a su vez se debe a las interacciones fuertes, no al campo de Higgs.

Lo cual no quiere decir que el Higgs sea irrelevante para la física de los

objetos cotidianos. Imagine que nos hiciésemos con un panel secreto que controlase las leyes físicas y que al girar lentamente el dial denominado «Higgs» pudiésemos hacer que disminuyese el valor del campo de Higgs en el espacio vacío desde los 246 GeV a cualquier valor más pequeño. (Nota: Ese panel secreto no existe.) A medida que decreciese el valor del campo de Higgs que nos rodea, también lo harían las masas de los quarks, los leptones con carga y los bosones W y Z. Las variaciones en las masas de los quarks y de los bosones W y Z darían lugar a minúsculas alteraciones en las propiedades de los protones y los neutrones, pero nada inmediatamente espectacular. Los cambios en el muón y el tau son casi irrelevantes para nuestra vida cotidiana. Pero cualquier variación de la masa del electrón sería extraordinariamente importante.

En la representación mental esquemática del átomo a la que estamos habituados, los electrones orbitan alrededor del núcleo como los planetas lo hacen alrededor del Sol, o la Luna alrededor de la Tierra. En este caso, la representación esquemática deja de tener validez, y tenemos que tomarnos en serio la mecánica cuántica. A diferencia de un planeta que orbita alrededor del Sol, un electrón típico no orbita a una distancia arbitraria, sino que en realidad estará lo más próximo posible al núcleo. (Si estuviese más alejado, tendería a perder energía emitiendo un fotón, y por tanto volvería a acercarse.) Y cuánto puede acercarse depende de su masa. Las partículas pesadas pueden apretarse en pequeñas regiones del espacio, mientras que las más ligeras siempre están más desperdigadas. Dicho de otro modo, el tamaño de los átomos depende de un parámetro fundamental de la naturaleza, la masa del electrón. Si esa masa disminuyese, los átomos serían mucho más grandes.

Eso es muy importante. Si hiciésemos que los átomos creciesen, el tamaño de los objetos ordinarios no crecería en la misma proporción. Lo que hace que la materia ordinaria permanezca unida es la química, las maneras que tienen los átomos de unirse unos a otros en interesantes combinaciones. Y la razón por la que se unen es porque comparten electrones, al menos cuando las circunstancias son las adecuadas. Y dichas circunstancias cambiarían por completo si el tamaño

de los átomos fuese otro. Si la masa del electrón variase solo un poco, seguiríamos teniendo «moléculas» y «química», pero las reglas específicas que conocemos en el mundo real cambiarían de manera significativa. Las moléculas sencillas, como la de agua (H₂O) o la de metano (CH₄), serían prácticamente iguales, pero las moléculas complejas, como el ADN, las proteínas, o las células vivas, resultarían inviables. En resumen: si la masa del electrón cambiase aunque fuese solo un poco, toda la vida dejaría de existir al instante.

Si cambiase mucho, los efectos serían en consecuencia más espectaculares. A medida que el valor del campo de Higgs se aproximase al cero, los electrones serían cada vez más ligeros y, por tanto, los átomos serían cada vez más grandes. Llegaría un momento en que alcanzarían tamaño macroscópico, y después tamaño astronómico. Cuando cada átomo fuese tan grande como el Sistema Solar, o como la Vía Láctea, dejaría de tener sentido hablar de «moléculas». El universo no sería más que un conjunto de átomos individuales superenormes, que chocarían los unos con los otros en el cosmos. Si la masa del electrón llegase a ser precisamente cero, los átomos ya no existirían, los electrones serían incapaces de unirse a los núcleos. Y si eso sucediese repentinamente, la respuesta a la pregunta de Hal Eisner con la que empezaba el capítulo sería afirmativa: la palomita de maíz estallaría.

Pero sucedería también algo más sutil. Pensemos en los tres leptones con carga: el electrón, el muón y el tau. La única diferencia entre estas partículas está en sus masas. Si anulamos el campo de Higgs, también se anulan las masas, y todas estas partículas se vuelven idénticas. (Nota técnica: las interacciones fuertes asimismo pueden influir sobre los valores esperados de los campos, con efectos similares a los del Higgs pero de mucha menor magnitud. En esta discusión estamos ignorando tales efectos.) Lo mismo sucedería con los tres quarks de carga $+2/3$ (up, charm y top) y para los tres con carga $-1/3$ (down, strange y bottom). Los componentes de cada grupo de partículas serían idénticos de no ser por la existencia del campo de Higgs en el que se desenvuelven. Lo cual señala a la que quizá sea la función más fundamental del Higgs: la ruptura

de simetrías.

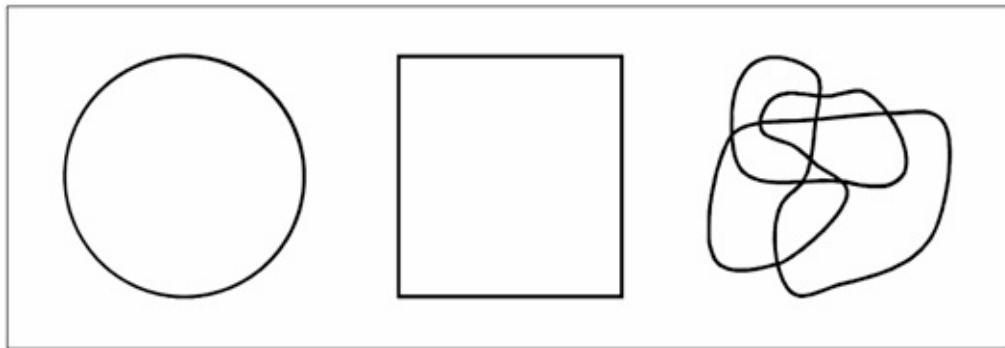
DEFINIR LA SIMETRÍA

Cuando pensamos en la palabra «simetría», lo que nos viene a la mente es una agradable regularidad. Los estudios han demostrado que los rostros simétricos, aquellos en que los lados izquierdo y derecho son iguales, suelen resultar más atractivos. Pero los físicos (y los matemáticos de quienes aprenden cosas como esta) quieren profundizar más y estudiar qué es lo que hace que algo sea «simétrico» en el sentido más general, y cómo aparecen estas simetrías en la naturaleza.

La sencilla idea de «lados izquierdo y derecho que coinciden» refleja una idea más general: decimos que un objeto posee una simetría cuando podemos transformarlo de alguna manera y acabar exactamente donde hemos empezado. En el caso de un rostro simétrico, podemos imaginar que hacemos que se refleje a lo largo de una línea vertical que pase por su punto medio, y volveríamos a obtener la misma cara. Pero los objetos más sencillos poseen muchas más simetrías.

Pensemos en una figura geométrica, como un cuadrado. Podemos tomar su imagen especular, reflejando ambos lados del cuadrado alrededor de un eje vertical que pase precisamente por el medio, y acabaríamos exactamente con el mismo cuadrado de partida. Eso es una simetría. También podríamos hacer lo mismo respecto a un eje horizontal, lo que es señal de que existe una simetría adicional. (Eso no funcionaría con una cara. Incluso la persona más bella tiene un aspecto distinto cuando se la ve invertida.) Ya puestos, podríamos hacer una reflexión respecto a cualquiera de los ejes diagonales (pero no respecto a un eje arbitrario, porque eso haría que se desplazasen las esquinas del cuadrado). También podemos rotar el cuadrado noventa grados en el sentido de las agujas del reloj alrededor de su punto central, o cualquier múltiplo de esa cantidad.

Como el cuadrado, el círculo parece muy simétrico, y de hecho lo es mucho más aún. No solo podemos obtener su imagen especular alrededor de cualquier eje que pase por su centro, sino que podemos también rotarlo en cualquier ángulo, y siempre obtendremos un círculo exactamente idéntico. Esa es mucha más libertad de la que teníamos con el cuadrado. Un garabato al azar, por el contrario, no tiene ninguna simetría en absoluto. Lo alteremos como lo alteremos, acabará siendo distinto.



Un círculo, un cuadrado y un garabato. El círculo posee un gran número de simetrías, incluidas las rotaciones de cualquier eje. Las simetrías del cuadrado son menos: rotaciones de noventa grados, reflexiones alrededor de los ejes vertical u horizontal, o combinaciones de las anteriores. El garabato no posee ninguna simetría.

Una simetría es una manera de decir «podemos alterar las cosas de una determinada manera sin que cambie nada importante». Da igual que rotemos un cuadrado noventa grados, o que obtengamos su reflejo alrededor de un eje central: acaba teniendo el mismo aspecto.

Desde este punto de vista, la idea de simetría quizá no parezca tan potente. Pues sí, da igual que rotemos el círculo, ¿y eso a quién le importa? La razón por la que nos importa es porque cuando las simetrías son lo suficientemente potentes imponen fuertes restricciones sobre lo que puede suceder. Supongamos que alguien le dice: «En este pedazo de papel he dibujado una figura que

seguiría teniendo el mismo aspecto aunque la haga girar un ángulo cualquiera». Sabría entonces que esa figura es un círculo (o un solo punto, que es como un círculo de tamaño nulo). Es la única figura que posee tal grado de simetría. De manera análoga, en física, con frecuencia podemos determinar cuál será el comportamiento de nuestros experimentos simplemente con entender cuál es la simetría que opera en cada caso.

Un caso clásico de simetría en física es la mera constatación de que da igual dónde realicemos un determinado experimento. Si este refleja principios fundamentales de la física, el resultado siempre será el mismo. Por ejemplo, hay un experimento famoso en el que un científico (normalmente joven, que a menudo se graba para después poder subir el vídeo a YouTube) introduce caramelos Mentos en una botella de Coca-Cola Light. La estructura porosa de los dulces cataliza la liberación del dióxido de carbono de la bebida, lo que da como resultado un impresionante géiser de espuma. El experimento no sale tan bien con otro tipo de caramelos o de bebida. Pero funciona igual de bien cuando se realiza en Los Ángeles, Buenos Aires o Hong Kong. No existe en la naturaleza una simetría bajo el intercambio de distintos tipos de comida o bebida, pero sí existe la simetría del cambio de posición. Los físicos la llaman «invariancia traslacional», porque no desperdician la ocasión de ponerle un nombre imponente a un concepto sencillo.

Cuando se trata de partículas o de campos, las simetrías nos dicen que podemos intercambiar distintos tipos de partículas, o incluso «rotarlas unas por otras». (Las comillas son útiles aquí porque estamos transformando campos unos en otros, no rotando direcciones en el universo tridimensional en el que vivimos.) El ejemplo más claro es el de los tres tipos de quarks con color, normalmente denominados «rojo», «verde» y «azul». Es completamente irrelevante con qué se corresponde cada uno de los nombres: si tienes delante tres quarks, no importa cuál sea el «quark rojo», cuál el «azul» y cuál el «verde». Puedes intercambiar esas etiquetas y toda la física relevante permanecerá inalterada: ese es el poder de la simetría. Si fuesen un quark y un electrón, no

podríamos intercambiar las etiquetas. Un quark es muy diferente de un electrón: tiene distinta masa, distinta carga y es sensible a la interacción fuerte. Aquí no opera ninguna simetría.

Si no fuese porque el campo de Higgs les da a las partículas elementales sus masas, habría una simetría que vincularía al electrón, el muón y el tau, ya que esas partículas serían idénticas en todos los sentidos, igual que Angelina y yo cruzábamos la habitación vacía a la misma velocidad. Podríamos intercambiar un muón por un electrón en una interacción, y los detalles no variarían. Podríamos incluso (según las reglas de la mecánica cuántica) crear una partícula que fuese mitad electrón y mitad muón, y también sería idéntica. Como lo sería, de hecho, cualquier combinación de las tres partículas, de manera análoga a como podemos rotar un círculo en un ángulo cualquiera. También aparecerían simetrías similares entre los quarks up, charm y top, así como entre los down, strange y bottom. Son lo que se conocen como simetrías de «sabor», y aunque el Higgs impide que se respeten por completo en la naturaleza, siguen siendo muy útiles para los físicos de partículas que analizan los distintos procesos básicos.

Pero existe otra simetría, más profunda y sutil que las de los sabores, que, en un principio, parece estar completamente oculta pero cuya importancia resulta ser absolutamente crucial. Es la simetría fundamental de las interacciones débiles.

CONEXIONES Y FUERZAS

La verdadera importancia de las simetrías —la razón por la que los físicos no pueden dejar de hablar de ellas— se debe a que cuando son suficientemente potentes dan lugar a las fuerzas de la naturaleza. Este es uno de los hallazgos más sorprendentes de la física del siglo xx, pero no es fácil de asimilar. Merece la pena que dediquemos un momento a entender cuál es la conexión entre simetrías y fuerzas.

Igual que, en el mundo cotidiano, existe una simetría que dice que: «no importa dónde se realice un experimento», hay otra que afirma que: «no importa en qué dirección esté orientado el experimento». Eche los caramelos en la Coca-Cola y verá salir la espuma. Gire todo el instrumental y póngalo orientado hacia el este, en lugar de hacia el norte, repítalo, y (dentro de la incertidumbre experimental) debería obtener el mismo resultado. Es lo que se llama, por razones evidentes, «invariancia rotacional».

De hecho, la cosa va aún más allá. Supongamos que estoy realizando mi experimento en el aparcamiento junto a mi oficina, y una amiga está haciendo otro experimento, sin relación alguna con el mío, a unos pocos metros de distancia. Si ambos rotamos los experimentos el mismo ángulo, es de esperar que obtengamos los mismos resultados. Pero, lo que es más, puedo rotar mi instrumental mientras ella mantiene el suyo como estaba al principio, o podemos rotarlos ambos en ángulos arbitrarios. Dicho de otro modo, la simetría no es únicamente bajo una única rotación del mundo (da igual que estemos todos mirando hacia el norte, o en cualquier otra dirección), sino bajo rotaciones distintas en cada punto (da igual en qué dirección está orientado cada uno de nosotros).

Eso significa que hay muchísima más simetría. Entre los que nos dedicamos a esto, este tipo de simetría se denomina «invariancia de gauge». El nombre se lo puso el matemático alemán Hermann Weyl, quien comparó la elección sobre cómo medir las cosas en distintos puntos con la elección del ancho de vía (*gauge*, en inglés) en los ferrocarriles. También se denominan simetrías «locales», puesto que podemos realizar la transformación de simetría por separado en cada ubicación. A diferencia de la anterior, una simetría «global» estaría basada en una transformación que debe realizarse uniformemente en todos los puntos al mismo tiempo. (Local no significa «solo en un punto», sino «por separado en cada punto». Las simetrías locales son más grandes y potentes que las globales.)

Puesto que podemos colocar nuestros equipos en distintas direcciones en cada

punto, cobra una importancia fundamental el hecho de que podamos comparar de alguna manera la configuración que hemos adoptado en los diferentes puntos. Pensemos en unos topógrafos que están levantando los planos de una casa de nueva planta. Pueden empezar por una esquina, lo cual fija la dirección en la que la casa estará orientada. Pero, si suponemos que la casa tendrá forma rectangular, querrán que la orientación del resto de las esquinas se alinee con la de la primera. No es posible construir una casa en la que las esquinas estén orientadas en direcciones cualesquiera. En el mundo real, esto no suele ser muy difícil: basta con dibujar varias líneas rectas, ya sea desplegando un hilo entre los puntos o utilizando el instrumental topográfico.

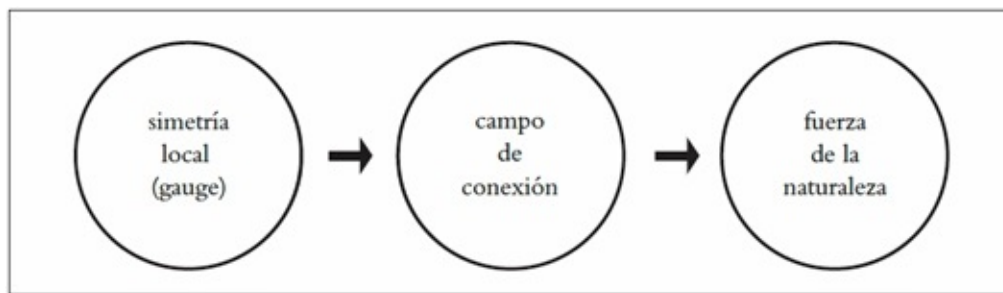
Imagine, no obstante, que el suelo en el que estamos construyendo la casa no está completamente nivelado. El terreno es desigual y, por razones estéticas, el cliente quiere que construyamos sobre los montículos en lugar de entrar con las niveladoras e igualarlo. En ese caso, nuestro problema se complica un poco: debemos tener en cuenta las variaciones del terreno a la hora de alinear las esquinas de nuestro edificio.

Este es el punto delicado: para que podamos relacionar nuestras ideas de lo que significa «la misma dirección» en distintos puntos del espacio, es necesario que exista un campo en el espacio que une dichos puntos, un campo que nos dice literalmente cómo conectarlos entre sí, y que en la literatura técnica se denomina una «conexión». En nuestro ejemplo arquitectónico, el campo relevante proviene de la altura del suelo en sí. Eso es un campo. Aunque no se trate de un campo fundamental, de los que al vibrar dan lugar a las partículas, sí que asocia un número a cada punto del terreno, que es lo que a fin de cuentas es un campo. (Un mapa topográfico sería una imagen del «campo de alturas».) La información que ese campo incorpora nos permite establecer relaciones entre lo que sucede en diferentes puntos del espacio.

Siempre que tenemos una simetría que nos permite llevar a cabo transformaciones independientes en distintos puntos (una simetría gauge), automáticamente viene con un campo de conexión que nos permite comparar lo

que sucede en esas ubicaciones. A veces el campo es del todo inocuo y ni siquiera notamos que existe, como la altura del terreno en una superficie que no es perfectamente plana. Pero cuando el campo de conexión varía mucho de un lugar a otro, las consecuencias son enormes.

Por ejemplo, cuando la altura del terreno varía de un lugar a otro, se puede ir de uno a otro esquiando (o patinando, dependiendo de las condiciones). Si el terreno es plano, uno permanecería ahí inmóvil; cuando el terreno tiene una inclinación, existe una fuerza que tira de uno hacia la base de la colina. Esa es la fórmula mágica que hace que el mundo evolucione, según la física moderna: Las simetrías dan lugar a campos de conexión, y las variaciones en los campos de conexión dan lugar a las fuerzas de la naturaleza.



El origen de las fuerzas de la naturaleza: las simetrías locales implican que existen campos de conexión, que dan lugar a las fuerzas.

Las cuatro fuerzas de la naturaleza —gravedad, electromagnetismo y las fuerzas nucleares fuerte y débil— están todas basadas en simetrías. (El bosón de Higgs también transmite una fuerza, pero no es el que hace que las partículas tengan masa; de eso se encarga el campo de Higgs, en segundo plano. Y no está basado en ninguna simetría.) Los campos bosónicos que transmiten estas fuerzas —gravitones, fotones, gluones y bosones W y Z— son todos campos de conexión que establecen relaciones entre las transformaciones de simetría en distintos puntos del espacio. A menudo, para recalcar este hecho, se les llama

«bosones de gauge».

Los campos de conexión definen unas pistas de esquí invisibles en todos los puntos del espacio, que dan lugar a las fuerzas que impulsan las partículas en distintas direcciones, dependiendo de cómo interaccionen. Está la pista de esquí gravitatoria, que afecta de la misma manera a todas las partículas; la electromagnética, que empuja en un sentido a las partículas de carga positiva y en la dirección contraria a las de carga negativa; una pista de esquí de la interacción fuerte, a la que solo son sensibles los quarks y los gluones; y una pista de la interacción débil que sienten todos los fermiones del Modelo Estándar, y también el propio bosón de Higgs.

En el caso de los gravitones, las simetrías responsables de la fuerza son aquellas de las que ya he hablado —traslaciones (cambios de posición) y rotaciones (variaciones de la orientación)— no en el espacio tridimensional, sino en el espacio-tiempo tetradimensional. Para las interacciones fuertes, la simetría establece relaciones entre los colores rojo, verde o azul de los distintos quarks. Da igual que describamos a un quark en particular como rojo, verde o azul, o cualquier combinación de los tres, de manera que existe una simetría.

Puede que no se haya dado cuenta de que las partículas con carga eléctrica siempre vienen en pares: una con carga positiva y otra con carga negativa. Eso se debe a que, para obtener una partícula cargada, son necesarios dos campos que puedan rotar el uno en el otro mediante la simetría de gauge del electromagnetismo. Un único campo por sí solo no puede estar cargado eléctricamente, puesto que no hay nada sobre lo que pueda actuar la simetría.

Llegamos por último a los bosones W y Z de las interacciones débiles. Son también campos de conexión, nacidos de cierta simetría básica de la naturaleza. Pero dicha simetría está disimulada por el campo de Higgs, por lo que describirla es algo más difícil.

EL PROBLEMA CON LAS SIMETRÍAS

El proceso que condujo al descubrimiento de la simetría que subyace en las interacciones débiles fue algo enrevesado. En los años cincuenta, antes incluso de que se hubiese inventado la idea de los quarks, los físicos se habían dado cuenta de que los neutrones y los protones eran muy parecidos en ciertos aspectos. El neutrón es un poquito más pesado, pero, a fin de cuentas, su masa es muy similar a la del protón. Obviamente, el protón tiene una carga eléctrica de la que el neutrón carece, pero la interacción electromagnética no es tan intensa como la fuerza nuclear fuerte y, por lo que respecta a esta última, ambas partículas parecen indistinguibles. Si nos interesasen en particular las interacciones fuertes, podríamos avanzar bastante suponiendo que el neutrón y el protón no son más que distintas versiones de un «nucleón» unificado. Es, como mucho, una simetría aproximada —las cargas y las masas son diferentes, de manera que la simetría no es perfecta—, pero aun así se le puede sacar mucho jugo.

En 1954, a Chen Ning Yang y Robert Mills se les ocurrió que esta simetría debería ser «promocionada» a simetría local, esto es, que deberíamos poder «rotar» neutrones y protones los unos en los otros en cualquier punto del espacio. Sabían lo que esto implicaba: la existencia de un campo de conexión y su correspondiente fuerza de la naturaleza. En un primer momento, la idea debió de parecer disparatada: ¿cómo se puede crear una simetría de gauge a partir de algo que, para empezar, solo de manera aproximada se puede considerar una simetría? Pero sucede a menudo que, con el tiempo, cuando entendemos mejor la naturaleza, se reconocen como brillantes ideas que en un principio parecían una locura.

Había un problema más importante. En esa época, existían dos teorías consolidadas basadas en simetrías locales: la gravedad y el electromagnetismo. Se habrá dado cuenta el lector de que ambas son fuerzas de largo alcance, y de que los bosones que las transmiten no tienen masa. Ninguno de estos hechos es mera coincidencia. Resulta que el requisito de la simetría local exige que el

bosón asociado tenga masa exactamente nula; y cuando el bosón no tiene masa, la fuerza que transmite puede extenderse a lo largo de distancias muy grandes. La fuerza de un bosón masivo decae enseguida debido a la energía necesaria para crear las partículas con masa, pero la fuerza de un bosón de masa nula puede tener un alcance infinito.

Lo que sucede con las partículas sin masa es que son fáciles de crear. Especialmente si hablamos de un campo con tendencia a interactuar con neutrones y protones, y estamos tratando de entender lo que sucede en el interior de un núcleo atómico, donde las fuerzas evidentemente son muy intensas. Con la perspectiva de 1954, parecía que ninguna partícula sin masa desempeñaba un papel importante en el interior del núcleo. Pero Yang y Mills perseveraron.

No fue fácil. En febrero de ese año, Yang impartió un seminario sobre su trabajo en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton. En el público, entre otras personalidades, estaba el físico Wolfgang Pauli, famoso por su mordacidad. Pauli sabía perfectamente que la teoría de Yang-Mills predecía un bosón sin masa, en parte porque él mismo había investigado un modelo similar que nunca llegó a publicar. No fue el único. Otros físicos, entre los que se encontraba Werner Heisenberg, barajaron ideas similares antes de que Yang y Mills las combinaran explícitamente.

Cuando formas parte del público de un seminario científico, alguna que otra vez se da la circunstancia que no estás de acuerdo con algo de lo que dice el orador. El protocolo habitual pasa por hacer una pregunta, o quizá hacer explícito tu desacuerdo, y después dejar que el orador continúe. Pero ese no era el estilo de Pauli, que interrumpió repetidamente a Yang, exigiendo saber cuál era la masa de esos bosones.

Yang, que había nacido en China en 1922 y se había trasladado a Estados Unidos para estudiar con Enrico Fermi, compartiría el premio Nobel de 1957 con T. D. Lee por su trabajo sobre la violación de la paridad (la simetría izquierda-derecha). Pero uno pocos años antes era aún relativamente joven y su reputación aún no estaba asentada. Ante la embestida de Pauli, Yang se quedó

sin respuesta, y acabó sentándose en silencio en mitad de su propio seminario. Robert Oppenheimer, que presidía el acto, lo persuadió para que continuase, mientras Pauli siguió rezongando en voz baja. Al día siguiente, Pauli le envió una breve nota a Yang: «Lamento que hicieras que me resultase prácticamente imposible hablar contigo tras el seminario. Con mis mejores deseos. Atentamente. W. Pauli».

Pauli no se equivocaba al mostrar su preocupación por la predicción de partículas sin masa no detectadas, pero Yang tampoco erraba al seguir defendiendo su idea a pesar de sus aparentes deficiencias. En su artículo, Yang y Mills reconocieron el problema, pero expresaron la vaga esperanza de que los efectos mecanocuánticos de las partículas virtuales hiciesen que sus bosones tuviesen masa.

Y casi tenían razón. Hoy sabemos que tanto las interacciones fuertes como las débiles se basan en las denominadas teorías de Yang-Mills. Y ambas fuerzas emplean maneras muy diferentes, pero igualmente ingeniosas y sorprendentes, de ocultar sus partículas sin masa. En la interacción fuerte, los gluones tienen masa nula, pero están confinados en el interior de los hadrones, de manera que nunca los observamos. En las interacciones débiles, los bosones W y Z carecerían de masa si no fuese por la interferencia del campo de Higgs, que se extiende por todo el espacio. El Higgs rompe la simetría en la que se basan, y una vez rota ya no hay motivo para que los bosones carezcan de masa. El recorrido hasta llegar a entender todo esto ha sido tortuoso.

ROMPIENDO SIMETRÍAS

Para entender cómo se puede «romper» una simetría, descendamos desde el terreno de la abstracción al mundo del día a día. Ya hemos comentado un par de ejemplos sencillos de simetrías que se dan a nuestro alrededor: da igual dónde estés, y da igual en qué dirección estés orientado. Las leyes físicas poseen otra

simetría, en la que es más difícil reparar: da igual a qué velocidad te muevas, idea que nada menos que el propio Galileo fue el primero en codificar.

Imagine que va en un tren, viajando a toda velocidad a través de la campiña. Supongamos que es un tren supermoderno, que utiliza levitación magnética para flotar sobre los raíles, en lugar de las ruedas de toda la vida. Si el tren es lo suficientemente silencioso y no encuentra sobresaltos en su recorrido, no hay manera de saber a qué velocidad nos movemos sin mirar por la ventana. Si se dedica a lo suyo, a hacer experimentos en el interior del tren, la velocidad a la que nos movemos no importa. Ya podríamos estar completamente parados, o yendo a 150 kilómetros por hora, que el efecto de echar los Mentos en la Coca-Cola sería exactamente el mismo.

En nuestra experiencia cotidiana, este llamativo hecho se nos oculta por un sencillo motivo: podemos mirar al exterior, o simplemente sacar la mano por la ventana. Inmediatamente nos damos cuenta de la velocidad a la que nos movemos, porque podemos medirla (o al menos estimarla) con relación al suelo o al aire.

Este es un ejemplo de ruptura de simetría. A las leyes de la física les da igual a qué velocidad te muevas, pero al suelo y al aire no. Ambos tienen una velocidad preferida, a saber, «en reposo respecto al suelo». Las reglas profundas del juego poseen una simetría, pero nuestro entorno no la respeta. Decimos que el entorno rompe la simetría. Eso es exactamente lo que el campo de Higgs hace con las interacciones débiles. Las leyes básicas de la física obedecen a una determinada simetría, pero el campo de Higgs la rompe.

La ruptura de simetría de que venimos hablando hasta ahora se suele denominar ruptura de simetría «espontánea». Es una manera de decir que la simetría en realidad sigue ahí, oculta en las ecuaciones fundamentales que rigen el mundo, pero que alguna característica de nuestro entorno hace que exista una dirección preferida. Ser capaz de sacar la mano por la ventana del tren y medir tu velocidad respecto al aire no afecta al hecho de que las leyes físicas son invariantes respecto a las distintas velocidades. De hecho, cuando hablamos con

propiedad decimos a veces que estas simetrías están «ocultas», en lugar de «rotas espontáneamente». Para más información sobre esta idea de espontaneidad véase el capítulo 11.

LAS SIMETRÍAS DE LAS INTERACCIONES DÉBILES

Resulta que, en lo fundamental, Yang y Mills iban por buen camino con su idea de la simetría entre neutrones y protones. Hoy en día sabemos que existen los quarks, evidentemente, por lo que la idea análoga sería proponer una simetría entre los quarks up y down. Tendría que enfrentarse a los mismos obstáculos: los quarks up y down tienen masas y cargas eléctricas distintas. Si el origen de esas características se pudiese ligar a la existencia del campo de Higgs, iríamos bien encaminados. Y, de hecho, se puede.

Aquí es donde las cosas se complican (tanto que hemos relegado los detalles al apéndice 1). (No podíamos esperar que fuese fácil: estamos hablando de una serie de descubrimientos que se tradujeron en múltiples premios Nobel.) El origen de las complicaciones reside en el hecho de que los fermiones elementales poseen una propiedad llamada «espín» (del inglés *spin*, «giro» o «rotación»). Las partículas sin masa, que siempre se mueven a la velocidad de la luz, pueden tener dos tipos de espín: hacia la derecha o hacia la izquierda. Puede imaginárselo así: «si la partícula se aproxima hacia usted, puede girar en el sentido de las agujas del reloj, o en sentido contrario». El secreto de las interacciones débiles es que existe una simetría que relaciona todas las partículas levógiras, y una fuerza asociada a ella, pero no existe la simetría correspondiente para las partículas dextrógiras. Las interacciones débiles violan la paridad, discriminan entre izquierda y derecha. Puede imaginarse la paridad como la operación de mirar el mundo a través de su reflejo en un espejo, en el que se intercambian izquierda y derecha. La mayoría de las fuerzas (nuclear fuerte, gravedad, electromagnetismo) actúan de la misma manera con independencia de

que las observemos directamente o a través de un espejo. Pero las interacciones débiles establecen diferencias entre izquierda y derecha.

La simetría de las interacciones débiles vincula pares de partículas levóginas, básicamente como sigue:

quark up ↔ quark down

quark charm ↔ quark strange

quark top ↔ quark bottom

electrón ↔ neutrino electrónico

muón ↔ neutrino muónico

tau ↔ neutrino tauónico

Las partículas que hemos unido en parejas aquí parecen a primera vista muy distintas, tienen masas y cargas diferentes. Eso se debe a que el campo de Higgs, actuando en segundo plano, rompe la simetría entre ellas. Si no fuese por el baile de máscaras que organiza el Higgs, las partículas de cada una de las parejas serían completamente indistinguibles, de la misma manera que consideramos que los quarks rojo, verde y azul son tres versiones distintas de la misma cosa.

El propio campo de Higgs rota bajo la simetría de las interacciones débiles, motivo por el cual, cuando su valor es distinto de cero en el espacio vacío, marca una dirección y rompe la simetría, igual que el aire toma una velocidad con respecto de la cual podemos tomar medidas cuando viajamos en nuestro tren. En el ejemplo anterior del péndulo, el estado de mínima energía del péndulo normal era perfectamente simétrico, en dirección vertical. El péndulo invertido, como el campo de Higgs, rompe la simetría al caer o bien a la izquierda o bien a la derecha.

Si estuviese completamente perdido en un bosque en mitad de la noche, todas las direcciones le parecerían iguales. Podría dar vueltas alrededor de su posición, pero eso no haría que mejorase su situación. Pero si tuviese una brújula, y quisiese caminar hacia el norte, la dirección que marcase la brújula rompería la

simetría: esa sería la dirección correcta, y el resto no. De la misma manera, sin campo de Higgs, el electrón y el neutrino electrónico, por ejemplo, serían partículas idénticas. Podría rotar la una en la otra, y las combinaciones resultantes seguirían siendo indistinguibles. El campo de Higgs, como la brújula, tiene una dirección preferida. Ahora existe una combinación determinada de campos que interactúa con la máxima intensidad con el campo de Higgs, a la que llamamos «electrón», y otra que no lo hace, que denominamos «neutrino electrónico». Esa distinción solo tiene sentido si se hace respecto al campo de Higgs que se extiende por todo el espacio.

Si no fuese por la ruptura de simetría, habría en realidad cuatro bosones de Higgs, en lugar de uno solo: dos parejas de partículas que se transforman unas en otras a través de la simetría de la interacción débil. Pero, cuando el campo de Higgs se extiende por todo el espacio, tres de esas partículas son «engullidas» por los tres bosones de gauge de las interacciones débiles, que pasan así de ser partículas transmisoras de fuerza con masa nula a convertirse en los bosones W y Z, que sí poseen masa. Sí, los físicos hablan así de verdad: los bosones de la interacción débil adquieren masa al engullir los bosones de Higgs adicionales. De lo que se come se cría.

DE VUELTA AL BIG BANG

La analogía entre el campo de Higgs y el péndulo invertido es realmente buena. Como el Higgs, las leyes físicas fundamentales para el péndulo son perfectamente simétricas, no distinguen entre izquierda y derecha. Pero el péndulo solo puede encontrarse en dos configuraciones estables: a la izquierda o a la derecha. Si tratásemos cuidadosamente de equilibrarlo de forma que su configuración fuese simétrica, en posición vertical, cualquier pequeño golpecito haría que cayese a un lado o a otro.

El campo de Higgs es similar. Se podría hacer que tomase un valor nulo en el

espacio vacío, pero esa configuración es inestable. En el caso del péndulo, si estuviese tranquilamente a la izquierda o a la derecha, tendríamos que proporcionarle energía para hacer que apuntase en dirección vertical. Lo mismo sucede con el campo de Higgs. Para desplazarlo desde su valor no nulo en todos los puntos del espacio y hacer que tomase valor cero, sería necesaria una cantidad ingente de energía, mucho mayor que la energía total del universo actualmente observable.

Pero el universo fue una vez un lugar mucho más denso, con mucha más energía condensada en un volumen mucho menor. En los instantes posteriores al big bang, hace 13.700 millones de años, la materia y la radiación estaban mucho más apiñadas, y la temperatura era extraordinariamente más elevada. Siguiendo con la analogía del péndulo, imagine que el péndulo invertido se encuentra sobre una mesa, en lugar de estar anclado al suelo. «Alta temperatura» implica mucho movimiento aleatorio por parte de las partículas; en los términos de la analogía, es como si alguien agarrase la mesa y empezase a sacudirla. Si lo hiciese con la suficiente energía, podríamos imaginar que el péndulo pasase de estar a la izquierda a la derecha (o viceversa). Si las sacudidas fuesen realmente muy energéticas, el péndulo vibraría como loco, saltando constantemente entre una posición y otra. En promedio, pasaría tanto tiempo a la izquierda como a la derecha. En otras palabras, a altas temperaturas, el péndulo invertido vuelve a ser simétrico.

Lo mismo sucede con el campo de Higgs. Estamos en los primeros momentos del universo, la temperatura es increíblemente alta, y el campo de Higgs está constantemente recibiendo empujones. En consecuencia, su valor en cualquier punto oscila constantemente, y en promedio es cero. En esos primeros instantes del universo, se recupera la simetría. Los bosones W y Z no tienen masa, igual que los fermiones del Modelo Estándar. El momento en que, en promedio, el campo de Higgs pasó de ser cero a tomar un valor no nulo es lo que se conoce como «transición de fase electrodébil». Se parece a la congelación del agua para convertirse en hielo, pero no había nadie por allí por aquel entonces para verlo.

Estamos hablando de los primerísimos instantes de la historia del universo: alrededor de una billonésima de segundo después del big bang. Si recreásemos las condiciones del universo temprano en el salón de casa, el Higgs pasaría de ser cero a su valor normal no nulo tan rápido que ni siquiera notaríamos que alguna vez su valor fue nulo. Pero los físicos pueden utilizar las ecuaciones para predecir la larga sucesión de eventos que tuvo lugar en esa primera billonésima de segundo. A día de hoy, no tenemos datos experimentales directos con los que contrastar esas ideas, si bien trabajamos para hacer predicciones que algún día podremos contrastar con las observaciones.

CAÓTICO PERO EFECTIVO

Esta historia puede parecer un poco forzada, cuando hablamos de campos de valor no nulo en el espacio vacío, de la naturaleza que discrimina entre izquierda y derecha, y de los bosones que ganan peso engullendo otros bosones, pero es una representación que se ha ido construyendo progresivamente a lo largo de muchos años, durante los cuales ha tenido que hacer frente a toda una corriente de voces escépticas. Y encaja con los datos.

Cuando Steven Weinberg y Abdus Salam aportaron las últimas piezas a la teoría de las interacciones débiles, en sendos artículos que publicaron de manera independiente a finales de la década de 1970, nadie les hizo ningún caso. Demasiado artificio, demasiados campos haciendo demasiadas cosas raras. En aquella época, habían deducido que debía de existir algo como los bosones W para transmitir la fuerza débil. Pero Weinberg y Salam predijeron una nueva partícula, el bosón Z neutro, de la que no había ninguna evidencia. Más tarde, en 1973, un experimento del CERN con el caprichoso nombre de Gargamelle encontró evidencias de la interacción que transmite el bosón que ahora llamamos Z. (La partícula en sí no fue descubierta hasta diez años después, también en el CERN.) Desde entonces, experimento tras experimento han ido acumulando

datos que apoyan la representación fundamental de la simetría de la interacción débil rota por un campo de Higgs.

En 2012, parece que por fin hemos dado con el Higgs. No obstante, esto no es el final de la historia, sino el principio. No cabe duda de que la teoría del Higgs encaja con los datos, pero en muchos aspectos parece demasiado enrevesada. Aparte del Higgs, cualquier otra partícula de las que hemos encontrado es o bien una «partícula de materia» fermiónica o un bosón derivado del campo de conexión asociado con una simetría. El Higgs parece diferente. ¿Qué lo hace tan especial? ¿Por qué solo esas simetrías, rotas de esa manera en particular? ¿Es posible que exista una teoría más fundamental que dé mejores resultados todavía? Ahora que disponemos de datos que estudiar, en lugar de limitarnos a inventar modelos, tenemos motivos para pensar que se nos ocurrirá una teoría mejor que esta, a la que hemos llegado gracias exclusivamente a nuestra capacidad mental.

El mundo a sus pies

Donde ideamos la manera de encontrar el bosón de Higgs y la forma de saber si lo hemos encontrado.

Tras años de espera, el descubrimiento del bosón de Higgs se produjo antes de lo que nadie imaginaba.

En cierto sentido, la expectación llevaba cuatro décadas acumulándose, desde que el mecanismo de Higgs se convirtió en el modelo aceptado de las interacciones débiles. Pero una vez que el LHC se puso en funcionamiento, la excitación alcanzó su punto álgido en diciembre de 2011.

A principios de ese mes, el CERN había hecho pública una nota bastante anodina anunciando los seminarios del 13 de diciembre, titulada: «Actualización del estado de la búsqueda del bosón de Higgs por los experimentos ATLAS y CMS en el CERN». Las actualizaciones se producen continuamente, así que eso por sí solo no debería provocar mucha excitación. Pero estamos hablando de dos experimentos enormes, cada uno de ellos formado por más de tres mil físicos, y enseguida se corrió la voz de que estos no serían unos seminarios cualesquiera. Ya el 1 de diciembre, el *Telegraph* británico había publicado una historia, firmada por Nick Collins, corresponsal de ciencia, titulada: «La búsqueda de la partícula divina llega a su fin. El CERN se dispone a anunciar el descubrimiento». El artículo en sí no era ni mucho menos tan espectacular como su titular, pero las implicaciones eran evidentes. En viXra, un blog sobre física, alguien bajo el seudónimo de Alex comentó sucintamente: «El rumor del día es este: Higgs de 125 GeV alrededor de 2-3 sigmas», lo que llevó a otros

comentaristas a especular sobre las implicaciones teóricas.

Alex podía ser cualquiera, por supuesto, desde un gamberro adolescente en Mumbai que disfrutara manipulando a los físicos de partículas al propio Peter Higgs. Pero numerosos blogs y artículos online señalaban en la misma dirección: esa no sería una actualización cualquiera, habría importantes noticias sobre el Higgs... quizá incluso el anuncio del descubrimiento que tanto tiempo llevábamos esperando.

El CMS y el ATLAS, las dos enormes colaboraciones experimentales del LHC, son sendas repúblicas en miniatura, en las que los ciudadanos eligen a los líderes que los representan. El cargo más alto se denomina simplemente «portavoz». Para garantizar que la colaboración habla con una sola voz, la preparación y la comunicación de nuevos resultados se lleva a cabo bajo un férreo control (no solo las publicaciones oficiales, sino incluso el contenido de las charlas que den los miembros de los experimentos han de pasar un minucioso escrutinio). Son los portavoces quienes toman la palabra en charlas tan importantes como estas. En diciembre de 2011, ambos portavoces eran italianos: Fabiola Gianotti, miembro del personal del CERN, lideraba el ATLAS, mientras que Guido Tonelli, de la Universidad de Pisa, estaba a la cabeza del CMS.

Gianotti es una referencia en la física de partículas experimental, una de las cien mujeres científicas más importantes de todo el mundo, según *The Guardian*. Había llegado a este campo relativamente tarde, como estudiante universitaria, después de haberse interesado principalmente por el latín, el griego, la historia y la filosofía en el instituto, y de haberse dedicado a fondo al estudio del piano en el conservatorio. Fue la explicación que dio uno de sus profesores del efecto fotoeléctrico —la hipótesis de Einstein de que la luz siempre está compuesta de paquetes discretos cuantizados— la que despertó su interés por la física. Y ahora lideraba uno de los mayores proyectos científicos de todos los tiempos, a punto de descubrir una pieza fundamental del rompecabezas de la naturaleza. Cuando le pidieron que explicase la importancia de esta búsqueda, Gianotti no dudó en recurrir al lenguaje poético: «El conocimiento fundamental es como el arte.

Tiene mucho que ver con el espíritu, el alma, la mente de hombres y mujeres, como seres inteligentes que somos».

Ambos oradores tenían noticias emocionantes que comunicar, pero lo hicieron con la mayor de las cautelas. Había indicios. El ATLAS, en particular, había observado algunas evidencias que parecían compatibles con un Higgs de unos 125 GeV. En física de partículas es frecuente que aparezcan y desaparezcan «evidencias» de cosas extrañas, pero esta no era una cosa cualquiera: se trataba de la señal que cabía esperar de la desintegración de bosones de Higgs, una vez descartado casi cualquier otro lugar donde podría existir. Cuando has perdido las llaves y las has buscado prácticamente por todos lados, no debería sorprenderte que aparezcan en el último lugar que te quedaba por rastrear. Para colmo, el CMS también vislumbró una señal con una masa muy similar. De nuevo, nada extraordinario por sí solo, pero, habida cuenta de los resultados del ATLAS, más que suficiente para que la sala entera se pusiese a murmurar.

Gianotti puso todo de su parte para contener el entusiasmo: «Es demasiado pronto para saber si este exceso se debe a una fluctuación de fondo o a algo más interesante». Después expresó el mismo sentimiento de manera más coloquial, con ayuda de un proverbio italiano: «No vendamos la piel del oso antes de cazarlo».

Pero la piel ya estaba vendida y ya se le había hecho hueco en el salón a la alfombra mucho antes de que cazasen al oso. Puede que, estadísticamente, los resultados de diciembre no fuesen nada extraordinarios, pero encajaban perfectamente con lo que los físicos esperaban observar si existiese un Higgs de 125 GeV. Parecía tan solo cuestión de tiempo que nuevos datos provenientes del LHC nos sacasen de dudas. Y ese tiempo fue más breve de lo que cualquiera hubiera podido imaginar.

LO QUE ENTRA

Detengámonos un momento y pensemos en lo que se necesita para descubrir el bosón de Higgs, o simplemente para encontrar sugerentes evidencias de su existencia. Simplificando las cosas (quizá incluso demasiado), podemos reducirlo a un proceso de tres pasos:

1. Crear bosones de Higgs.
2. Detectar las partículas en las que se desintegran.
3. Convencernos de que las partículas provienen realmente del Higgs, y no de otra cosa distinta.

Examinemos los pasos uno por uno.

Conocemos la idea fundamental para crear bosones de Higgs: acelerar protones a altas energías en el LHC, hacer que choquen entre sí dentro de uno de los detectores y confiar en que se produzca un Higgs. Hay más detalles, por supuesto. Podemos confiar en que se producirán bosones de Higgs cuando alcancemos energías muy elevadas porque $E = mc^2$ nos dice que cabe la posibilidad de que se creen partículas muy pesadas. Pero pensar que existe una posibilidad es muy distinto de tener la certeza de que sucederá. ¿Cuáles son los procesos precisos por los cuales podemos esperar que se creará el Higgs?

Lo primero que le viene al lector a la mente es: «Bueno, los protones chocan entre sí y sale un Higgs». Pero si lo piensa un poco más recordará que los protones están compuestos de quarks y gluones, por no hablar de las antiquarks virtuales. Por lo tanto, deben ser las combinaciones de quarks y gluones las que colisionan para dar lugar al Higgs. A continuación recuerda que en el capítulo 7 he hablado de las leyes de conservación (magnitudes como la carga eléctrica, el número de quarks o el de leptones, que permanecen invariables en todas las interacciones de partículas que conocemos). Así que no puede suceder, por ejemplo, que se forme un Higgs a partir de la colisión únicamente de dos quarks up. El Higgs tiene carga eléctrica nula, mientras que la de cada quark es $+2/3$, de manera que los números no cuadran. Para colmo, los dos quarks up nos dan un

número total de quarks de 2, mientras que el Higgs tiene un número de quarks igual a cero, por lo que eso tampoco cuadra. Si fuesen un quark y un antiquark los que chocasen, aún cabría alguna posibilidad.

¿Y qué hay de los gluones? La respuesta rápida es: «Sí, dos gluones pueden combinarse para crear un Higgs», pero la respuesta por extenso es algo más complicada. Recuerde que la función del campo de Higgs (o una de las funciones, al menos) es proporcionar masa a otras partículas. Cuanto más interactúe con un objeto, más masa acaba teniendo este. Lo contrario también es cierto: el Higgs interactúa de buena gana con las partículas pesadas, le cuesta más hacerlo con las más ligeras, y no interactúa directamente en absoluto con las partículas sin masa, como los fotones y los gluones. Pero, gracias a la magia de la teoría cuántica de campos, puede hacerlo de manera indirecta. Los gluones no interactúan directamente con el Higgs, pero sí lo hacen con los quarks, que a su vez interactúan con el Higgs. De manera que la colisión de dos gluones puede producir un Higgs, con los quarks como paso intermedio.

Los físicos de partículas han desarrollado un formalismo muy detallado y rigurosamente probado para entender cómo interactúan las partículas entre sí. Richard Feynman, el brillante físico, ganador del premio Nobel, inventó un método extraordinariamente útil para llevar la cuenta de todas estas interacciones: los diagramas de Feynman. Se trata de pequeñas viñetas de la interacción y la evolución temporal de las partículas hasta dar lugar a otras partículas. Los bosones portadores de las fuerzas se dibujan como líneas onduladas; los fermiones, como líneas continuas; y el Higgs como una línea de puntos. Partiendo de un conjunto fijo de interacciones fundamentales, y mezclando y combinando sus correspondientes diagramas, se pueden calcular todas las maneras distintas de producir partículas o de convertirlas unas en otras.

Por ejemplo, podemos partir de dos gluones, representados por líneas onduladas. Estas vibraciones del campo gluónico provocan vibraciones en los campos de quarks, que podemos imaginar como pares quark-antiquark. Puesto que, en cada caso, hay un quark y un antiquark, la carga y el número total de

quarks es cero, lo que cuadra con la situación de partida. Estos quarks son partículas virtuales, que desempeñan un papel fundamental como intermediarios pero están condenadas a desaparecer antes de que puedan ser observadas en un detector de partículas. Cuando se encuentran, uno de los pares quark-antiquark se aniquila mutuamente, mientras que el otro produce un bosón de Higgs. Todos los tipos de quark contribuyen a este proceso, aunque los quarks top lo hacen en mayor medida, puesto que (al ser el sabor de quark más pesado) interactúan más intensamente con el Higgs. Todo esto se podría describir con precisión mediante un par de líneas de imponentes fórmulas matemáticas. O bien se puede reflejar con elegancia en un único y simpático diagrama.

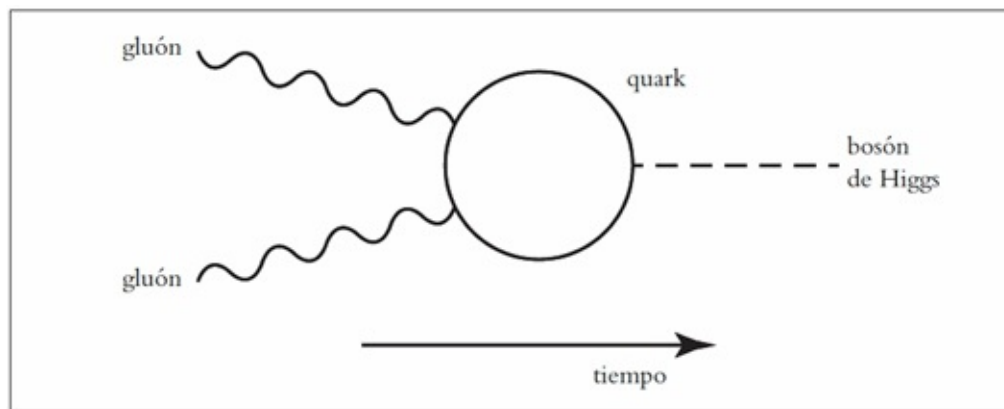


Diagrama de Feynman que representa la unión de dos gluones para crear un bosón de Higgs, con un paso intermedio de quarks virtuales.

Los diagramas de Feynman constituyen una manera divertida y sugerente de plasmar las posibilidades que se pueden dar cuando las partículas entran en interacción. Sin embargo, los físicos los emplean para la prosaica tarea de calcular la probabilidad cuántica de que la interacción representada tenga lugar. Cada diagrama se corresponde con un número, que se puede calcular siguiendo una serie de reglas sencillas, que sin embargo pueden resultar confusas a primera vista. Por ejemplo, una partícula que retrocede en el tiempo cuenta como una

antipartícula, y viceversa. Cuando dos partículas se unen para dar lugar a una tercera (o una se desintegra en dos), la energía total y el resto de las magnitudes conservadas deben compensarse. Pero las partículas virtuales —las que se mueven en el interior del diagrama pero no forman parte de los productos iniciales ni de los finales— no tienen por qué tener la misma masa que poseería una partícula real. La manera correcta de entender el diagrama anterior es que dos vibraciones en el campo gluónico se unen y dan lugar a una vibración en el campo de Higgs. Lo que observamos en la práctica son dos gluones que se unen para crear un bosón de Higgs.

La primera persona en darse cuenta de que la «fusión de gluones» era una forma prometedora de crear bosones de Higgs fue Frank Wilczek, el físico teórico estadounidense que había sido uno de los pioneros en la comprensión de las interacciones fuertes (trabajo que llevó a cabo en 1973, mientras estudiaba el doctorado, y por el que acabaría compartiendo el premio Nobel). En 1977 era profesor en Princeton, pero durante el verano pasó un tiempo de visita en el Fermilab. Incluso los más grandes pensadores han de preocuparse por los problemas mundanos de la vida cotidiana, y en esta ocasión Wilczek había pasado todo el día cuidando de su mujer, Betsy Divine, y de su pequeña, Amity, ambas enfermas. Una vez que las dos se quedaron dormidas, Wilczek salió a pasear por los terrenos del Fermilab para pensar en física. Ya por aquel entonces empezaba a estar claro que, en palabras del propio Wilczek, el Modelo Estándar era, a grandes rasgos, «cosa hecha», pero que las propiedades del bosón de Higgs aún estaban relativamente por descubrir. El trabajo de su tesis doctoral le había llevado a encariñarse con los gluones y sus interacciones, y durante su paseo cayó en la cuenta de que los gluones constituían una estupenda manera de producir bosones de Higgs (y de que estos a su vez podían desintegrarse dando lugar a gluones). He aquí que, treinta y cinco años más tarde, este proceso es la manera más importante que tiene el LHC de producir bosones de Higgs. Durante esa misma caminata, a Wilczek también se le ocurrió la idea del «axión», un hipotético pariente del Higgs de menor masa que ahora se ha erigido en un

prometedor candidato para constituir la materia oscura del universo. He aquí una demostración de lo importantes que pueden ser los paseos largos y tranquilos para el progreso de la física.

En el apéndice 3 comentaré las distintas maneras en que las partículas pueden interactuar según el Modelo Estándar y los diagramas de Feynman correspondientes a cada una de ellas; no con tanta profundidad como para que pueda obtener un doctorado en física, pero espero que sí con el suficiente detenimiento como para que comprenda la idea general. Una cosa debe quedar clara: es un poco lioso. Es muy fácil decir: «Hacemos que choquen los protones y esperamos a que salga un Higgs», pero sentarse y hacer los cálculos cuidadosamente es muy laborioso. A fin de cuentas, una variedad de procesos contribuye a la creación de los bosones de Higgs en el LHC: la fusión de dos gluones, como acabamos de ver; análogamente, la fusión de un W^+ con un W^- , o de dos bosones Z , o de un quark y un antiquark; y la producción de un W o de un Z que emiten un Higgs antes de proseguir su camino. Los detalles dependen de la masa del Higgs, así como de la energía de las colisiones originales. El cálculo de los procesos relevantes mantiene ocupados a tiempo completo a los físicos teóricos.

LO QUE SALE

¿Conque has producido un bosón de Higgs? ¡Enhorabuena! Ahora viene la parte complicada: ¿cómo sabes que lo has creado?

Las partículas pesadas tienden a desintegrarse, y el Higgs es realmente muy pesado. La vida media del Higgs se estima en algo menos de un zeptosegundo (10-21 segundos), lo que significa que recorre menos de una milmillonésima de milímetro desde que se crea hasta que se desintegra. Ni siquiera con los detectores de última generación que hay en el interior del ATLAS y el CMS hay manera de observarlo. Pero sí podemos ver en qué se desintegra el Higgs.

También veremos las cosas en las que se desintegran otras partículas distintas del Higgs. Lo difícil es distinguir la minúscula señal de la enorme cantidad de ruido de fondo.

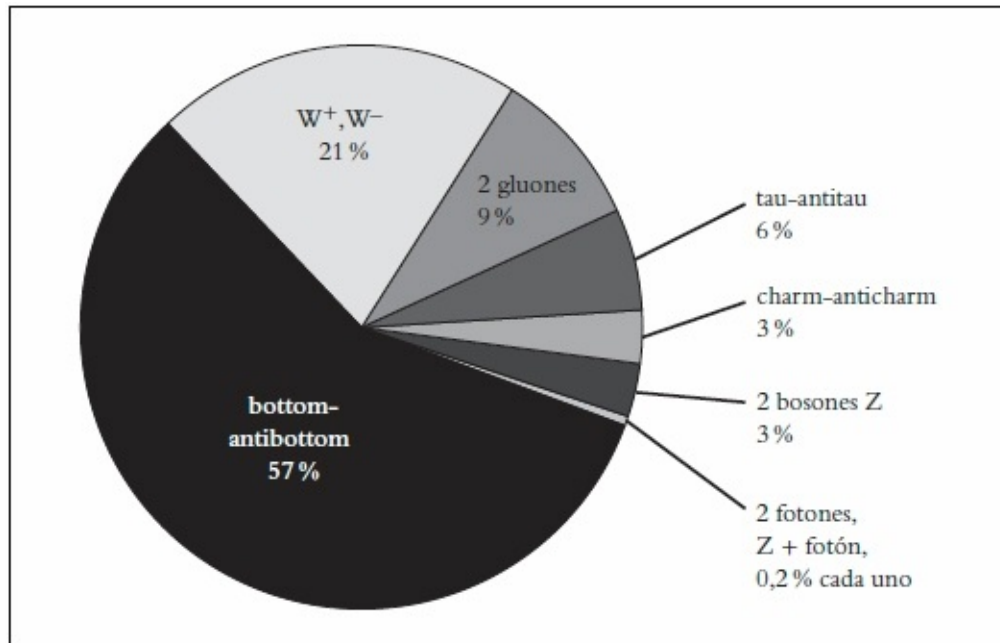
El primer paso es calcular exactamente en qué se desintegrará el Higgs, y con qué frecuencia. Por lo general, el Higgs tiende a acoplarse con partículas pesadas, por lo que cabría esperar que se desintegre fundamentalmente en quarks top y bottom, bosones W y Z y en el leptón tau, y no tanto en partículas más ligeras, como los quarks up y down o los electrones. Y eso es básicamente correcto, aunque hay algunas sutilezas (ya sabía que sería así...).

Por una parte, el Higgs no puede desintegrarse en algo más pesado que él. Sí puede transformarse temporalmente en partículas virtuales pesadas que a su vez se desintegren, pero los procesos como ese son muy poco probables si las partículas virtuales son mucho más pesadas que el Higgs original. Si el Higgs pesase 400 GeV, podría perfectamente desintegrarse en un quark top y un antitop, que pesan cada uno 172 GeV. Pero para una masa más realista de 125 GeV, los quarks top quedan fuera del alcance del Higgs, y los quarks bottom constituyen el modo de desintegración preferido. Este es uno de los motivos por los que las versiones más pesadas del Higgs (de hasta 600 GeV) habrían sido de hecho más fáciles de detectar, incluso aunque se necesitase más energía para crearlas: la proporción de desintegración en partículas pesadas sería mucho más elevada.

La figura representa un gráfico circular con la proporción aproximada de los distintos modos de desintegración de un bosón de Higgs de 125 GeV de masa, de acuerdo con el Modelo Estándar. El Higgs se desintegrará en un quark bottom y un antibottom la mayor parte de las veces, pero hay otras posibilidades importantes. Aunque este valor de la masa del Higgs lo hace difícil de detectar, una vez que lo conseguimos hay muchísima física interesante por estudiar. Podemos medir cada modo de desintegración por separado y compararlo con las predicciones, y cualquier desviación será señal de la física que existe más allá del Modelo Estándar, tal como partículas adicionales o interacciones inusuales.

Incluso hemos visto indicios de que estas desviaciones podrían de hecho existir.

Pero aún nos queda mucho trabajo por hacer. Recuerde nuestra discusión sobre los detectores de partículas del capítulo 6, donde hemos visto cómo las distintas capas de la cebolla experimental nos permitían identificar a las diferentes partículas: electrones, fotones, muones y hadrones. Y ahora vuelva a mirar el gráfico. Más del 99 por ciento de las veces, el Higgs se desintegra en cosas que no observamos directamente en los detectores. Más bien, el Higgs se desintegra en algo, que a su vez se desintegra (o se transforma) en algo distinto, y es esto último lo que acabamos detectando. Lo cual hace que nuestra vida sea más complicada, o más interesante, dependiendo de cómo lo mire.



Probabilidad de que un bosón de Higgs de 125 GeV de masa se desintegre en distintas partículas. Los números no suman exactamente el 100 por ciento debido a los redondeos.

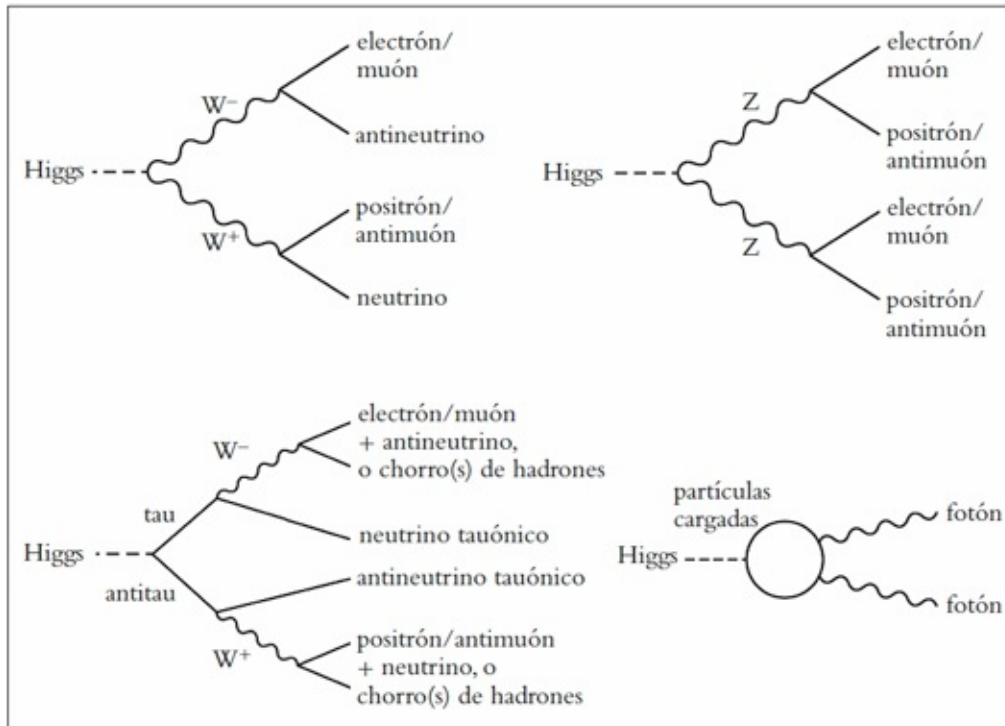
Alrededor del 70 por ciento de las veces, el Higgs decae en quarks (bottom-antibottom o charm-anticharm) o en gluones. Estas son partículas con color, que no se observan por separado. Cuando se producen, las interacciones fuertes

intervienen y crean una nube de quarks/antiquarks/gluones que se condensan en chorros de hadrones. Dichos chorros son los que detectamos en los calorímetros. El problema —y es un gran problema— es que hay muchos otros procesos que producen chorros como esos. Si hacemos que choquen protones de alta energía, produciremos montones de chorros, de los cuales solo una pequeña parte serán el resultado de la desintegración de bosones de Higgs. Los experimentalistas sin duda se esfuerzan al máximo por extraer datos de una señal de este tipo, pero no es la manera más fácil de detectar el Higgs. En el primer año completo de operación del LHC, se estima que se produjeron más de 100.000 bosones de Higgs, pero la mayoría de ellos se desintegraron en chorros que se perdieron en la cacofonía de las interacciones fuertes.

Cuando el Higgs no se desintegra directamente en quarks o gluones, suele hacerlo en bosones W, bosones Z o pares tau-antitau. Todos estos son canales que es útil observar, pero los detalles dependen de en qué se descompongan a su vez estas partículas con masa. Cuando se producen pares de tau, por lo general se desintegran en un bosón W con la carga apropiada más un neutrino tauónico, por lo que la situación es en buena medida similar a lo que sucede cuando el Higgs se desintegra directamente en bosones W. A menudo, la desintegración de un W o un Z produce quarks, que dan lugar a chorros, difíciles de discernir del fondo. No es imposible (los experimentalistas prestan mucha atención a las desintegraciones hadrónicas), pero tampoco se trata de un resultado limpio.

Sin embargo, en ocasiones los bosones W y Z pueden desintegrarse exclusivamente en leptones. El W puede decaer para dar lugar a un leptón cargado (electrón o muón) y a su neutrino correspondiente, mientras que el Z puede desintegrarse directamente en un leptón cargado y su antipartícula. Sin la interferencia de los chorros, estas señales son relativamente limpias, aunque bastante poco habituales. El Higgs se desintegra en dos leptones cargados aproximadamente el 1 por ciento de las veces, y en cuatro leptones con carga alrededor del 0,01 por ciento de las ocasiones. Cuando la desintegración del W da lugar a la creación de neutrinos, la energía desaparecida hace que estos

eventos sean difíciles de identificar, pero no dejan de ser útiles. En los eventos en que se forman cuatro leptones cargados a partir de la desintegración del Z no hay energía desaparecida que emborrona la situación, por lo que son los más buscados, aunque son tan poco habituales que es difícil observarlos.



Cuatro modos de desintegración prometedores para descubrir un bosón de Higgs de 125 GeV. El Higgs puede desintegrarse en dos bosones W, que a su vez (en ocasiones) decaen en electrones o muones y sus neutrinos correspondientes. O puede desintegrarse en dos bosones Z, que a continuación (en ocasiones) decaen en electrones o muones y sus antipartículas. O puede desintegrarse en un par tau-antitau, que después lo hace a su vez en neutrinos y otros fermiones. O puede hacerlo también en alguna partícula cargada que a su vez se transforma después en dos fotones. Todos estos son procesos poco habituales, pero relativamente fáciles de detectar en los experimentos del LHC.

Y, a veces, gracias a una pequeña ayuda de las partículas virtuales con carga eléctrica, el Higgs puede desintegrarse en dos fotones. Como carecen de masa, los fotones no se acoplan directamente con el Higgs, pero este puede primero producir una partícula cargada y con masa, que a su vez se transforma en un par

de fotones. Esto sucede únicamente alrededor del 0,2 por ciento de las veces, pero es en última instancia la señal más clara que podemos observar de un Higgs de 125 GeV. La proporción es apenas bastante como para que podamos obtener un número suficiente de eventos, y el ruido de fondo es lo suficientemente pequeño como para que podamos observar cómo la señal del Higgs se eleva por encima de él. La mejor evidencia del Higgs que hemos podido obtener procede de los eventos con dos fotones.

Este vertiginoso recorrido por las distintas formas de desintegración del Higgs no es más que un repaso rápido de la enorme cantidad de esfuerzo teórico invertido en comprender las propiedades del bosón de Higgs. Un proyecto que comenzó en 1975 con un artículo seminal de John Ellis, Mary K. Gaillard y Dimitri Nanopoulos, que trabajaban por aquel entonces en el CERN, en el que investigaban cómo se podrían producir y detectar bosones de Higgs. Desde entonces, un gran número de trabajos han profundizado en el asunto, incluido un libro entero, titulado *The Higgs Hunter's Guide*, de John Gunion, Howard Haber, Gordon Kane y Sally Dawson, que ha ocupado un lugar prominente en las estanterías de toda una generación de físicos de partículas.

En los primeros tiempos había muchas cosas que aún no se entendían sobre el Higgs. Su masa siempre fue un número completamente arbitrario, que solo hemos conseguido determinar gracias a la diligente labor de los físicos experimentales. En su artículo, Ellis, Gaillard y Nanopoulos concentraron su atención en masas de 10 GeV o menos. De haber estado en lo cierto, habríamos encontrado el Higgs hace muchos años, pero la naturaleza no fue tan amable con nosotros. Y no pudieron resistirse a rematar el artículo con «una disculpa y un aviso»:

Pedimos disculpas a los experimentalistas por no tener ni idea de cuál es la masa del bosón de Higgs [...] y por no estar seguros de cuál es su grado de acoplamiento con otras partículas, salvo por el hecho de que probablemente sea muy pequeño. Por estos motivos, no pretendemos fomentar la búsqueda experimental del Higgs a gran escala, pero sí pensamos que quienes realizan experimentos susceptibles de encontrar el bosón de Higgs deberían saber cómo y dónde podría aparecer.

Por suerte, la búsqueda experimental a gran escala acabó concitando los suficientes apoyos, aunque tuvo que pasar un tiempo. Y ahora estamos obteniendo los frutos.

ALCANZAR RELEVANCIA

Con frecuencia se dice que buscar el bosón de Higgs es como buscar una aguja en un pajar, o en un enorme número de pajares. David Britton, un físico de Glasgow que contribuyó a la construcción de la red de computación del LHC en el Reino Unido, ofrece una analogía mejor: «Es como buscar un puñado de paja en un pajar. Con la diferencia de que, si buscas una aguja en un pajar, la reconoces cuando la encuentras, porque es distinta de toda la paja. [...] La única manera de hacerlo es coger todos y cada uno de los puñados de paja del pajar, ponerlos uno detrás de otro y ver de pronto que hay toda una serie de ellos que tienen la misma longitud. Eso es exactamente lo que estamos haciendo».

Ese es el reto: los productos de cualquier desintegración individual del bosón de Higgs, incluso cuando son partículas «de las buenas», como dos fotones o cuatro leptones, también podrían haberse producido a través de otros procesos que no tienen nada que ver con el Higgs (y, en la mayoría de las ocasiones, así será). No se trata simplemente de que estemos buscando determinado tipo de evento, sino que busquemos una cantidad ligeramente excesiva de eventos de un determinado tipo. Es como si tuviésemos un pajar lleno de tallos de paja de todos los tamaños, y lo que buscásemos fuese un ligero exceso de los tallos de un determinado tamaño. No será cuestión de examinar en detalle cada puñado, sino que habrá que recurrir a las estadísticas.

Para hacernos una idea de hasta qué punto nos serán de utilidad las estadísticas, empecemos con una tarea mucho más sencilla. Tenemos una moneda, que si lanzamos al aire nos dará cara o cruz, y queremos determinar si

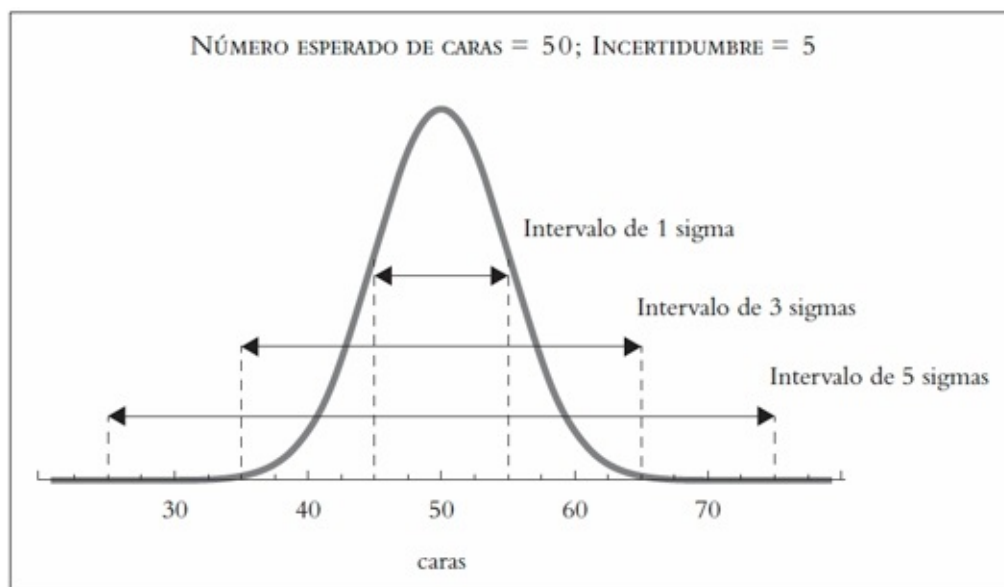
la moneda está «trucada» o no, es decir, si la probabilidad de que salga cara y de que salga cruz es la misma, del 50 por ciento. Para ello, no nos bastará con lanzar la moneda dos o tres veces (con tan pocos intentos, ninguno de los resultados posibles sería verdaderamente sorprendente). Cuantas más veces lanzamos la moneda al aire, mayor es la precisión con la que podremos determinar si está trucada o no.

Partimos de la «hipótesis nula», una manera elegante de decir que «no sospechamos que suceda nada extraño». Para la moneda, la hipótesis nula es que cada vez la probabilidad de que salga cara o cruz es del 50 por ciento. En el caso del bosón de Higgs, la hipótesis nula correspondiente es que todos los datos se han generado como si no hubiese Higgs. A continuación, nos preguntamos si los datos reales son consistentes con la hipótesis nula, es decir, si existe una probabilidad razonable de que hubiésemos obtenido esos resultados con una moneda aunque no estuviera «trucada», o sin que el Higgs anduviese por ahí.

Imagine que lanzamos la moneda cien veces. (En realidad, deberían ser muchas más, pero estamos un poco vagos.) Si la moneda fuese perfectamente limpia, esperaríamos obtener cincuenta caras y cincuenta cruces, o algo parecido. Por ejemplo, no nos sorprendería obtener 52 caras y 48 cruces, pero si saliesen 93 caras y solo 7 cruces empezariamos a desconfiar. Lo que nos gustaría es cuantificar exactamente cuál debería ser nuestro grado de desconfianza. Dicho de otro modo, ¿cuál debería ser la desviación respecto del 50-50 para determinar que la moneda está trucada?

No existe una respuesta rápida y concluyente. Podríamos lanzar la moneda mil millones de veces, obtener solo caras y, en principio, podría ser porque hubiésemos tenido muchísima suerte. Así es como funciona la ciencia. No «demostramos» los resultados, cosa que sí se puede hacer en matemáticas o en lógica, sino que vamos acumulando evidencias que avalan su verosimilitud. Una vez que los datos difieren lo suficiente de lo que cabría esperar si fuese cierta la hipótesis nula, la rechazamos y seguimos con nuestras vidas, incluso aunque no hayamos alcanzado una certeza metafísica.

Puesto que estamos considerando procesos que son inherentemente probabilísticos, y que solo estudiamos un número finito de eventos, no puede sorprendernos que nos desviemos del resultado ideal. De hecho, podemos calcular cuál sería la desviación que cabría esperar normalmente, que se denota con la letra griega sigma, escrita σ . Esto nos permite expresar de manera conveniente la magnitud de la desviación que observamos en la práctica (¿cómo es de grande respecto a sigma?). Si la diferencia entre la medición observada y la predicción ideal es de dos veces la incertidumbre típica esperada, diremos que tenemos un resultado de «dos sigmas».



Intervalos de confianza al lanzar una moneda cien veces, cuyo valor esperado es de 50, con una incertidumbre de $\sigma = 5$. El intervalo de un sigma va desde 45 a 55; el de tres sigmas, desde 35 a 65; y el de cinco sigmas, desde 25 a 75.

Cuando realizamos la medida, la variabilidad del resultado predicho suele tomar forma de campana, como se ve en la figura. Estamos representando la probabilidad de obtener distintos resultados (en el ejemplo, el número de caras cuando lanzamos la moneda cien veces). La curva tiene un pico en el valor más

probable, que en este caso es cincuenta, pero hay una dispersión natural alrededor de dicho valor. Esta dispersión, la anchura de la campana, es la incertidumbre en la predicción o, lo que es equivalente, el valor de sigma. Cuando lanzamos la moneda cien veces, $\sigma = 5$, por lo que diríamos que: «Esperamos obtener cara cincuenta veces, más menos cinco».

Lo bueno de tomar sigma como referencia es que se traduce en la probabilidad de que obtuviésemos el resultado que efectivamente se da (aunque la fórmula explícita es complicada y, por lo común, lo que se hace es consultarla). Si lanzamos una moneda cien veces y obtenemos entre 45 y 55 caras, decimos que estamos «en un sigma», lo que sucede el 68 por ciento de las veces. Dicho de otra manera, una desviación de más de un sigma ocurre el 32 por ciento de las veces (lo cual es bastante a menudo, por lo que una desviación de un sigma no es nada extraordinario). No diríamos que la moneda está trucada solo porque hemos obtenido 55 caras y 45 cruces al lanzarla cien veces.

Cuanto mayor es el número de sigmas, más improbables son los resultados (si la hipótesis nula es correcta). Si obtenemos sesenta caras en cien lanzamientos, es una desviación de dos sigma, cosa que solo sucede el 5 por ciento de las veces. Parece improbable, pero no completamente inverosímil. No basta para rechazar la hipótesis nula, aunque sí puede ser suficiente para levantar sospechas. Obtener 65 caras supondría una desviación de tres sigmas, lo cual se produce el 0,3 por ciento de las veces. Eso ya empieza a ser bastante poco habitual, y ahora existen razones de peso para pensar que algo raro está pasando. Si hubiésemos sacado 75 caras en cien lanzamientos, sería un resultado de 5 sigmas, algo que solo sucede una vez en un millón. Estaría entonces justificado pensar que no se trata de una rareza estadística, sino que la hipótesis nula no es correcta, la moneda está trucada.

La física de partículas, puesto que se basa en la mecánica cuántica, es muy parecida a lanzar monedas al aire: lo máximo que podemos hacer es predecir probabilidades. En el LHC provocamos las colisiones de protones y predecimos la probabilidad de que tengan lugar distintas interacciones. En el caso particular de la búsqueda del Higgs, tenemos en cuenta diferentes «canales», cada uno de los cuales se define por las partículas que se capturan en el detector: está el canal de dos fotones, el de dos leptones, el de cuatro leptones, el de dos chorros y dos leptones, etcétera. En cada caso, sumamos la energía total de las partículas resultantes y la maquinaria de la teoría cuántica de campos (con la ayuda de las mediciones experimentales) nos permite predecir cuántos eventos esperamos observar a cada energía, que normalmente forman una curva continua.

Esa es la hipótesis nula, lo que esperamos sin ningún bosón de Higgs. Si existe un Higgs de una determinada masa, su principal efecto es el de aumentar el número de eventos que cabría esperar a la energía correspondiente: un Higgs de 125 GeV de masa da lugar a partículas adicionales cuya energía total será de 125 GeV, por ejemplo. Crear un Higgs y dejar que se desintegre constituye un mecanismo (además de todos los procesos en los que no interviene el Higgs) para producir partículas cuyo valor total de la energía coincide típicamente con el de la masa del Higgs, lo que da lugar a unos pocos eventos adicionales por encima del fondo. Así que salimos a la búsqueda de «protuberancias», de desviaciones notables respecto a la curva continua que veríamos si el Higgs no estuviese ahí.

Predecir cómo sería el fondo que cabría esperar no es una tarea en absoluto sencilla. Conocemos el Modelo Estándar, por supuesto, pero el mero hecho de conocer la teoría no implica que sea fácil hacer predicciones. (El Modelo Estándar también describe la atmósfera terrestre, pero no por ello es fácil hacer previsiones meteorológicas.) Los potentes programas informáticos de que disponemos hacen todo lo que pueden para simular los resultados más probables de las colisiones entre protones, y esos resultados se aplican sobre una simulación de los propios detectores. Aun así, reconocemos de buena gana que

hay tasas de ocurrencia que es más fácil medir que predecir. De manera que, con frecuencia, lo mejor es llevar a cabo un análisis «ciego», esto es, utilizar algún método para disimular los datos reales que nos interesan, ya sea añadiendo datos ficticios o simplemente evitando fijarnos en determinados eventos, y después esforzarnos al máximo por entender los aburridos datos de las demás regiones. Solo después de haber alcanzado la mejor comprensión posible «abrimos la caja» y estudiamos los datos en los que podríamos encontrar la partícula que buscamos. Un procedimiento como este contribuye a garantizar que no vemos cosas solo porque queremos verlas, que solo las vemos si efectivamente están ahí.

Pero esto no siempre fue así. En su libro *Nobel Dreams*, el periodista Gary Taubes narra la historia del trabajo de Carlo Rubbia a principios de la década de 1980, que le llevó a descubrir los bosones W y Z, y por el que recibió el premio Nobel, así como sus intentos infructuosos de obtener un segundo premio Nobel por encontrar física más allá del Modelo Estándar. Una de las herramientas que empleó en sus análisis el equipo de Rubbia fue el Megatek, un sistema informático capaz de representar los datos de las colisiones de partículas y permitir que el usuario rotase la imagen en tres dimensiones utilizando un joystick. Los lugartenientes de Rubbia, el estadounidense James Rohlf y el inglés Steve Geer, se convirtieron en unos maestros del Megatek. Con un vistazo a un evento, eran capaces de darle un par de vueltas, seleccionar los rastros de partículas importantes y afirmar con confianza que estaban viendo un W, un Z o un tau. «Disponemos de todo este poder de computación —decía Rubbia—, pero el propósito de esta enorme capacidad de análisis de los datos, el resultado fundamental, es permitir que sea el ser humano quien dé la respuesta final. Es James Rohlf, al observar el p**o evento, quien decidirá si es un Z o no.» Las cosas han cambiado. Ahora disponemos de muchos más datos, pero la única manera de comprender realmente lo que estamos viendo es dejando que sea el ordenador el que los analice y decida por nosotros.

Siempre que algún supuesto resultado experimental levanta expectación, la

primera pregunta que habría que hacerse es: «¿Cuántos sigmas?». En física de partículas, con los años se ha ido consolidando un estándar informal según el cual una desviación de tres sigmas se considera «evidencia» de que algo sucede, mientras que se requiere una desviación de cinco sigmas para poder afirmar que algo se ha «descubierto». Puede parecer excesivamente exigente, puesto que un resultado de tres sigmas ya es algo que sucede solo el 0,3 por ciento de las veces. Pero la manera correcta de entenderlo es esta: si observamos trescientas mediciones distintas, es probable que una de ellas sea una anomalía de tres sigmas solo por mera casualidad. Así que es buena idea exigir cinco sigmas.

En los seminarios de diciembre de 2011, el pico cerca de los 125 GeV tenía una relevancia de 3,6 sigmas en los datos del ATLAS, y de 2,6 sigmas en los del CMS (que son completamente independientes). Datos sugerentes, pero no lo suficiente para afirmar que se había descubierto algo. En contra de la relevancia del resultado se manifestaba el «efecto look-elsewhere» («mirar a otro lado»), que se resume en que, como acabamos de comentar, es probable encontrar grandes desviaciones si se estudian muchas mediciones posibles distintas, cosa que los experimentos del LHC sin duda hacían. Pero, por otra parte, el hecho de que ambos experimentos observasen protuberancias en el mismo sitio era algo extremadamente sugerente. Teniéndolo todo en cuenta, la opinión de la comunidad era que los experimentos probablemente iban por buen camino, y que probablemente estábamos viendo los primeros atisbos del Higgs, pero que solo con más datos saldríamos de dudas.

Cuando en las predicciones que intentamos comprobar intervienen probabilidades, nunca se insiste lo suficiente en la importancia de acumular la mayor cantidad de datos posible. Pensemos de nuevo en el ejemplo de lanzar la moneda al aire. Si solo la hubiésemos lanzado cinco veces en lugar de cien, la mayor desviación posible respecto al valor esperado habría consistido en sacar todo caras (o todo cruces). Pero la probabilidad de que eso suceda es superior al 6 por ciento. De manera que, incluso para una moneda completamente trucada, ni siquiera podríamos decir que existe una desviación de dos sigmas respecto a

una moneda limpia. En Cosmic Variance, un blog comunitario en el que colaboro, que forma parte del sitio web de la revista *Discover*, publiqué una entrada la víspera de los seminarios del CERN, titulada «Lo que no se anunciará mañana: El descubrimiento del bosón de Higgs». No es que tuviese información privilegiada, sino que todos sabíamos el volumen de datos que el LHC había generado hasta ese momento, y simplemente no era suficiente para afirmar que se había producido el descubrimiento del Higgs con cinco sigmas. Habría que esperar a acumular más datos.

CAZAMOS EL OSO

La sensación general entre los físicos fue de que, si los indicios de 2001 eran señal de algo real, los datos recopilados en 2012 serían suficientes para superar el umbral mágico de los cinco sigmas necesario para poder hacer público el descubrimiento. Sabíamos cuántas colisiones se estaban produciendo en el LHC, y la sensación en todo el mundo era que estaríamos en condiciones de comunicar el descubrimiento (o una decepción desoladora) un año más tarde, en diciembre de 2012.

Tras la parada invernal de cada año, el LHC retomó la recopilación de datos en febrero. La Conferencia Internacional sobre Física de Altas Energías (ICHEP, International Conference on High Energy Physics), en Melbourne, estaba programada para principios de julio, y ambos experimentos pensaban ofrecer información actualizada de sus progresos en la reunión. Las condiciones en 2012 eran algo distintas de las de 2011, por lo que no era del todo evidente a qué ritmo se producirían los avances. Además, estaban utilizando energías más altas —8 TeV, en lugar de 7 TeV— y una mayor luminosidad, por lo que estaban obteniendo más eventos por segundo.

Estas dos cosas parecen mejoras, y lo son, pero también suponen complicaciones añadidas. Una energía más alta implica tasas de interacción

ligeramente diferentes, lo que a su vez acarrea que varíe ligeramente el número de eventos de fondo, cosa que obliga a calibrar los nuevos datos por separado respecto a los datos antiguos. Una mayor luminosidad significa que hay más colisiones, pero muchas de estas colisiones se producen simultáneamente en el detector, lo cual da lugar al efecto conocido como «pileup»: se observan un montón de rastros de partículas, pero cuesta mucho determinar cuáles proceden de cada colisión. Es un problema que da gusto tener, aunque no deja de ser algo que hay que resolver, y eso lleva tiempo.

La ICHEP es un importante evento internacional, y un escenario lógico en el que ofrecer información actualizada sobre el progreso de la búsqueda del Higgs una vez que se hubiesen empezado a recibir los nuevos datos a energías más elevadas. Lo que la gente esperaba escuchar era que la máquina estaba funcionando a pleno rendimiento y que, idealmente, la relevancia estadística de los indicios de diciembre estaba aumentando, y no disminuyendo. Estaba previsto que el LHC hiciese una pausa en la recogida de datos a principios de julio para unas tareas de mantenimiento ordinarias, y se había elegido ese momento como un punto natural en el que revisar los datos con detenimiento para ver lo que contenían.

Ambos experimentos estaban analizando sus datos a ciegas. La «caja» que contenía los datos reales de la región de interés se abrió el 15 de junio, lo que daba a los experimentalistas un plazo de tres semanas para averiguar qué era lo que tenían y cómo lo presentarían en Melbourne.

Los rumores empezaron a circular casi de inmediato. Eran algo más vagos de lo que lo habían sido en diciembre, lo cual es comprensible: los propios experimentalistas se las deseaban para entender qué era lo que tenían entre manos. Al final, creo que ninguno de los rumores acertó exactamente con el resultado. Pero la idea general era clara: estaban viendo algo grande.

Lo que estaban viendo era, evidentemente, una nueva partícula: el Higgs, o algo bastante parecido. Bastaba con echar un vistazo rápido a los datos para entenderlo. La expectación aumentó inmediatamente: una mera actualización no

iba a ser suficiente para presentar los datos al público. O hay descubrimiento o no. Y si lo hay, no se anuncia a media voz, sino que se pregona a los cuatro vientos.

Mientras los subgrupos dentro de cada experimento analizaban frenéticamente los datos de los distintos canales, los responsables discutían cómo difundir la noticia. Por una parte, estaba previsto que ambos experimentos ofreciesen su información actualizada en Melbourne, y cancelar el acto sería algo impropio. Por otra parte, en el CERN había cientos de físicos que no iban a volar a la otra punta del mundo, y ese día era tan suyo como de cualquier otro. Al final, se acordó una solución intermedia: cada experimento ofrecería un seminario el primer día de la conferencia, pero los seminarios tendrían lugar en Ginebra y se retransmitirían en directo en Australia.

Por si eso no fuese suficiente para convencer a las personas ajenas al CERN de que habría noticias importantes, enseguida se propagó el rumor de que el CERN estaba invitando a grandes personalidades para que estuviesen presentes en los seminarios. Peter Higgs, que entonces tenía ochenta y tres años, se encontraba en una escuela de verano en Sicilia, y tenía previsto volver a Edimburgo, pues su seguro de viaje había caducado, y además no llevaba francos suizos consigo. Pero cambió sus planes cuando John Ellis, eminente teórico del CERN y experto desde hace mucho tiempo en el bosón de Higgs, le dejó el siguiente mensaje telefónico: «Díganle a Peter que si no viene al CERN el miércoles es muy probable que se arrepienta de ello». Así que acudió, como también lo hicieron François Englert, Gerald Guralnik y Carl Hagen, los otros teóricos que habían sido los primeros en desarrollar el mecanismo de Higgs.

En diciembre de 2011, yo estaba en California y me perdí los seminarios, que empezaban a las cinco de la madrugada hora del Pacífico, porque estaba durmiendo. Pero en julio de 2012 conseguí comprar un billete de avión a Ginebra y estaba en el CERN para el gran día. Como muchos otros, corrí de un edificio a otro en el laboratorio, tratando de obtener mis credenciales. En un momento dado tuve que hacer uso de mi facilidad de palabra para convencer a

un guardia de seguridad para que me dejase volver a entrar en un edificio del que acababa de salir, explicándole que se me hacía tarde. «¿Por qué tiene todo el mundo tanta prisa hoy?», me preguntó.

Como en diciembre, cientos de personas (en su mayoría jóvenes) llevaban haciendo cola desde la noche anterior para conseguir un buen asiento en el auditorio. De nuevo, fue Gianotti la que habló en nombre del ATLAS, pero el mandato de Tonelli como portavoz del CMS había llegado a su fin, y quien habló fue su sucesor, Joe Incandela, de la Universidad de California, en Santa Bárbara. Incandela y Gianotti se habían curtido trabajando juntos en el UA2, uno de los detectores del anterior colisionador de hadrones del CERN, y habían buscado el bosón de Higgs en los datos de ese experimento. Ahora estaban a punto de ver los frutos de tantos años de búsqueda.

Todos los que se encontraban en la sala sabían que no se habría armado tanto alboroto si la señal se hubiese desvanecido. La cuestión principal era saber cuántos sigmas. Entre los rumores y las estimaciones a vuelapluma, la opinión mayoritaria se inclinaba por que cada experimento habría alcanzado una relevancia de cuatro sigmas, pero no habría logrado llegar a los cinco. Sin embargo, combinarlos ambos nos permitiría superar el umbral de los cinco sigmas. Pero combinar los datos de dos experimentos diferentes es mucho más complicado de lo que parece, y se pensaba que no habría dado tiempo a hacerlo en las últimas tres semanas. No era tampoco despreciable la preocupación de que una vez más nos quedásemos con la miel en los labios, pero no fuésemos capaces de confirmar el descubrimiento.

No obstante, la preocupación resultó ser en vano. Incandela, que fue el primero en hablar, repasó uno por uno los distintos canales analizados por el CMS. Primero, los eventos de dos fotones que mostraron un pico notable justo donde lo esperábamos, en 125 GeV. La relevancia era de 4,1 sigmas. Más que el año anterior, pero insuficiente para un descubrimiento. Después vinieron los eventos con cuatro leptones cargados, que resultan de la desintegración del Higgs en dos bosones Z. Otro pico, en el mismo lugar, esta vez de 3,2 sigmas de

relevancia. En su sexagésimo cuarta transparencia, Incandela reveló lo que se obtiene al combinar esos dos canales: 5,0 sigmas. Se acabó. Lo habíamos encontrado.

Gianotti, como Incandela, hizo especial hincapié en agradecer el trabajo de todos los que contribuían a mantener el LHC en funcionamiento, e insistió en el cuidado con el que los miembros del ATLAS habían analizado sus datos. Cuando llegó a los resultados para los dos fotones, de nuevo se observó un pico evidente en 125 GeV. En este caso, la relevancia era de 125 GeV. Los resultados para los cuatro leptones siguieron en la misma línea: un pico pequeño pero discernible, con una relevancia de 3,4 sigmas. Al combinarlos ambos, la relevancia total que se obtenía era de exactamente 5,0 sigmas. Al finalizar su exposición, Gianotti dio las gracias a la naturaleza por poner el Higgs allí donde el LHC pudiese encontrarlo.

Según el ATLAS, la masa del Higgs era de 126,5 GeV, mientras que en el CMS esta era de 125,3 GeV. Pero ambos resultados coincidían, dentro del margen de error experimental. El CMS analizó más canales, además de los de dos fotones y cuatro leptones, y en consecuencia su relevancia final acabó disminuyendo ligeramente, hasta los 4,9 sigmas. Pero, de nuevo, eso es consistente con la imagen general. La concordancia entre ambos resultados era asombrosa, y de una importancia fundamental. Si el LHC solo hubiese tenido un único detector dedicado a buscar el Higgs, la comunidad física habría tenido muchas más dudas a la hora de aceptar los resultados sin más. Con dos detectores, las dudas se disiparon. Era un descubrimiento.

Una vez finalizados los seminarios, Peter Higgs se emocionó. Más tarde, lo explicó así: «Durante las charlas conseguí mantener la tranquilidad, pero cuando el seminario terminó era como estar viendo un partido de fútbol en el que el equipo local consigue la victoria. La gente se puso en pie para aplaudir a los oradores, hubo vítores y pataleos. Fue como si una ola me derribase». Después del acto, en la sala de prensa, los periodistas trataron de sacarle algún comentario más, pero rehusó, diciendo que en un día como ese toda la atención debía

concentrarse en los experimentalistas.

Retrospectivamente, muchas cosas salieron bien en la primera mitad de 2012 para hacer posible que el descubrimiento del Higgs se produjese antes de lo que casi todo el mundo esperaba. El LHC estaba trabajando a pleno rendimiento, recopilando más eventos en unos pocos meses que en todo 2011. El pileup era un problema, pero los analistas de datos lo superaron heroicamente, y la inmensa mayoría de los eventos se reconstruyeron satisfactoriamente. El hecho de que la energía fuese más alta hizo que aumentase el ritmo de producción de bosones de Higgs. Y los equipos habían perfeccionado sus procedimientos de análisis, consiguiendo extraer de sus datos más relevancia que nunca. Todas estas mejoras hicieron que, para los físicos de partículas, la Navidad se adelantase a julio.

¿QUÉ ES?

Tras los seminarios, Incandela reflexionaba: «Solemos pensar que, una vez que hemos descubierto algo, ese es el final. Lo que he aprendido en la ciencia es que casi siempre es el principio. Casi siempre hay algo muy grande a la vuelta de la esquina, a nuestro alcance, y tenemos que perseguirlo. ¡No podemos bajar la guardia!».

No cabe duda de que el CMS y el ATLAS han encontrado una nueva partícula. Y apenas cabe duda de que la nueva partícula se parece al bosón de Higgs: sus tasas de desintegración a través de los distintos canales coinciden aproximadamente con lo que el Modelo Estándar nos permite estimar para un Higgs de 125 GeV de masa. Pero hay motivos de sobra para plantearse si este es realmente el Higgs más sencillo posible, o algo más sutil. En los datos hay pequeños indicios que podrían indicar que esta nueva partícula no es simplemente el Higgs mínimo. Es demasiado pronto para saber si dichos indicios son reales, podrían perfectamente desvanecerse, pero lo que sí sabemos a ciencia cierta es que los experimentos seguirán indagando para averiguar qué es lo que

sucede realmente.

Recuerde que las partículas no aparecen en el detector llevando un etiqueta. Cuando decimos que hemos encontrado algo compatible con un bosón de Higgs, nos referimos al hecho de que el Modelo Estándar permite hacer predicciones muy específicas, una vez que se conoce la masa del Higgs. No hay más parámetros libres. Si sabemos cuál es ese número, podemos decir con precisión cuántas desintegraciones se producirán en cada canal. Afirmar que observamos algo similar al Higgs es decir que observamos excesos de la magnitud adecuada en todos los canales en los que deberíamos verlos, no solo en uno.

Los cifras que aparecen en el cuadernillo central muestran los datos del ATLAS y el CMS en 2011 y principios de 2012, prestando particular atención a las colisiones que crearon dos fotones. Lo que vemos es la cantidad de eventos en los que los dos fotones suman una determinada energía total. Fíjese en cuán pocos son en realidad estos eventos. El experimento observa cientos de millones de interacciones por segundo, de las cuales alrededor de doscientas pasan el filtro del disparador y se graban para la posteridad. Pero, en los datos acumulados a lo largo de todo un año, solo tenemos alrededor de mil eventos para cada energía.

La curva discontinua en la figura es la predicción para el fondo, lo que cabría esperar sin el Higgs. La línea continua es lo que sucede cuando incluimos el Higgs ordinario del Modelo Estándar, con una masa de 125 GeV. Ambas curvas muestran una pequeña protuberancia con unos doscientos eventos más de lo esperado. No podemos determinar cuáles de estos eventos son desintegraciones del Higgs y cuáles pertenecen al fondo, pero sí podemos preguntarnos si el exceso es estadísticamente significativo. Y lo es.

Una inspección más detallada revela algo curioso sobre estos datos. Una de las razones por las que nos sorprendió encontrar el Higgs tan rápido en 2012 es que los experimentos de hecho observaron más eventos de los que deberían. La relevancia del exceso observado para los dos fotones en los datos del ATLAS es de 4,5 sigmas, pero, con la cantidad de colisiones que se había analizado, el

Modelo Estándar predice que se debería haber llegado únicamente hasta 2,4 sigmas. Análogamente, en el CMS la relevancia era de 4,1 sigmas, aunque se esperaba que alcanzase tan solo 2,6 sigmas.

Dicho de otro modo, había más eventos adicionales con dos fotones de los que debería. No muchos más: las protuberancias son un poquito más grandes de lo esperado, pero dentro de las incertidumbres conocidas. Sin embargo, el hecho de que sean compatibles entre ambos experimentos (y con los resultados del ATLAS solo para 2011) es algo intrigante. No cabe duda de que necesitaremos muchos más datos para saber si esta discrepancia es real o no.

Los datos del CMS presentaban otro pequeño aunque notable rompecabezas. Mientras que el ATLAS se limitó a los sólidos canales de los dos fotones o los cuatro leptones, el CMS también analizó otros tres más ruidosos: tau-antitau, bottom-antibottom y dos bosones W. Como cabría esperar, los canales bottom-antibottom y WW no ofrecieron resultados estadísticamente significativos (aunque cuando dispongamos de más datos la situación sin duda mejorará). Sin embargo, el análisis del canal tau-antitau fue desconcertante. No se observó ningún exceso en 125 GeV, a pesar de que el Modelo Estándar lo predice. Esta discrepancia no era realmente significativa desde un punto de vista estadístico, pero sí resultaba interesante. De hecho, fue esta ligera tensión con los datos del tau la que redujo la relevancia final del análisis completo del CMS hasta los 4,9 sigmas, a pesar de que los canales de dos fotones y de cuatro leptones habían llegado cada uno a los cinco sigmas por separado.

¿Qué podía estar pasando? Ninguno de los indicios era lo suficientemente serio como para que pudiésemos estar seguros de que algo pasaba, así que quizá no merezca la pena dedicarle demasiado tiempo a estas discrepancias. Pero así es como nos ganamos la vida los teóricos. Apenas un día o dos después de los seminarios, empezaron a aparecer online artículos teóricos tratando de explicarlo todo.

Es fácil dar un solo ejemplo sencillo del tipo de cosa que los autores de los artículos imaginan. Recuerde cómo se produce la desintegración del Higgs en

dos fotones. Puesto que estos carecen de masa, y por tanto no interactúan directamente con el Higgs, la única manera de que la desintegración se produzca es a través de alguna partícula virtual que haga de intermediaria, que ha de poseer tanto masa (para que se acople con el Higgs) como carga eléctrica (para hacer lo propio con los fotones).

Las reglas de los diagramas de Feynman nos indican cómo calcular la tasa de ocurrencia de este proceso, sumando las contribuciones independientes de todas las distintas partículas con masa que podrían aparecer en el bucle central del diagrama. Sabemos cuáles son las partículas del Modelo Estándar, así que no es tan difícil hacer el cálculo. Pero nuevas partículas podrían fácilmente introducir variaciones en el resultado, al contribuir a esos procesos virtuales incluso aunque no hayamos sido capaces de detectarlas directamente. Por lo tanto, la cantidad anómalamente elevada de eventos podría ser la primera señal de la existencia de partículas más allá del Modelo Estándar, que contribuirían a la desintegración del Higgs en dos fotones.

Los detalles son importantes, por supuesto: si las nuevas partículas que nos imaginamos alteran también las tasas de los demás procesos observados, tendremos problemas. Pero es emocionante pensar que estudiando el Higgs podríamos aprender cosas no solo sobre esta partícula, sino sobre otras que aún no hemos encontrado.

No bajemos la guardia.

Difundiendo el mensaje

Donde desvelamos el proceso que se sigue para obtener los resultados y para comunicar los descubrimientos.

Con toda la solemne flema británica de la que era capaz, el corresponsal John Oliver le estaba planteando algunas espinosas preguntas a Walter Wagner, el hombre que había acudido a los tribunales para evitar que el Gran Colisionador de Hadrones entrase en funcionamiento. La acusación era grave: el LHC suponía un peligro para la supervivencia de la vida sobre la Tierra.

JO: Entonces, aproximadamente, ¿cuál es la probabilidad de que se destruya el mundo? ¿Una en un millón, una en mil millones?

WW: Bueno, mi mejor estimación ahora mismo es una probabilidad aproximada de uno sobre dos.

JO: Un momento. ¿Es del cincuenta por ciento?

WW: Sí, cincuenta-cincuenta... Si cabe la posibilidad de que algo suceda, y también de que no suceda, o bien ocurrirá o bien no. De manera que la mejor estimación es de uno sobre dos.

JO: No estoy seguro de que sea así como funcionan las probabilidades, Walter.

Cuando el LHC se estaba poniendo en marcha en 2008, los físicos se esforzaron por difundir el mensaje de que esa máquina nos ayudaría a encontrar el bosón de Higgs, quizá también revelaría por primera vez la supersimetría, y posiblemente descubriría otros fenómenos excitantes y exóticos como la materia

oscura o las dimensiones adicionales. Pero, frente a esta alentadora historia del triunfo de la curiosidad humana, otra narrativa opuesta luchaba por captar la atención del público: El LHC era un experimento potencialmente peligroso que recrearía el big bang y sería capaz de destruir el mundo.

Por aquel entonces, el escenario de unos científicos locos fuera de control ganaba en la competencia por la atención. No es que los periodistas estuviesen dispuestos a ignorar la verdad y buscasen el puro sensacionalismo. (Al menos, la mayoría no. En el Reino Unido, el tabloide *Daily Mail* publicó un gran titular que decía: «Todos vamos a morir el próximo miércoles».) Lo que sucedía, más bien, es que, igual que la expresión «partícula divina», parecía que los escenarios de desastre debían formar parte obligatoriamente de cualquier historia sobre el asunto. Una vez planteada la idea de que cabe la posibilidad de que el LHC acabe con todos los humanos del planeta —incluso aunque la probabilidad sea ínfima—, esa es la cuestión sobre la que la sociedad quiere oír hablar. A esto hay que añadir la quijotesca lucha que libró contra el LHC en Hawai Walter Wagner, un beligerante ex funcionario de seguridad nuclear. Una vez que el caso fue desestimado por motivos (bastante evidentes) de falta de jurisdicción, Wagner recurrió ante un tribunal federal. Finalmente, un tribunal formado por tres jueces desestimó el caso en 2010, con un lacónico fallo:

Por consiguiente, el supuesto daño, la destrucción de la Tierra, no es en modo alguno atribuible a la omisión, por parte del gobierno estadounidense, de la obligación de redactar un estudio de impacto ambiental.

El CERN y otras organizaciones de físicos se tomaron muy en serio la necesidad de garantizar que se actuaba en condiciones de seguridad, y patrocinaron numerosos estudios de expertos sobre el asunto, todos los cuales llegaron a la conclusión de que el riesgo de que se produjese un desastre era mínima. La entrevista con Oliver, que permitió que Wagner se desacreditase a sí mismo, fue una de las pocas historias en los medios de comunicación que adoptó

el enfoque adecuado. Apareció en *The Daily Show* de Jon Stewart, un programa satírico de noticias del canal Comedy Central. Solo un programa de humor tuvo la suficiente agudeza como para tratar la preocupación sobre un desastre en el LHC como la farsa que era.

Algo que jugaba contra los físicos es su inclinación natural a ser tanto precisos como sinceros, algo que con frecuencia dificulta la transmisión de su mensaje. Los temores de que el LHC pudiese destruir el mundo se basaban en parte en teorías físicas respetables, aunque especulativas. Por ejemplo, si la gravedad fuese mucho más intensa de lo habitual a las elevadas energías que se alcanzan en una colisión entre partículas en el LHC, sería posible crear agujeros negros diminutos. Todo lo que sabemos sobre la física nos lleva a predecir que los agujeros negros de esas características se evaporarían sin provocar daño alguno. Pero es posible que todo lo que sabemos sea erróneo, y que se formen agujeros negros estables, y que el LHC los produzca, y que se implanten en el núcleo terrestre y vayan consumiéndolo gradualmente, lo que llevaría al planeta, tras un tiempo, al colapso definitivo. Si calculamos el tiempo que tardaría en suceder, el resultado es mucho mayor que la edad actual del universo. Evidentemente, nuestros cálculos podrían ser erróneos. Pero, en ese caso, las colisiones de los rayos cósmicos de alta energía deberían producir minúsculos agujeros negros por todo el universo. (El LHC no hace nada que el universo no esté haciendo continuamente y a energías mucho más elevadas.) Y esos agujeros negros deberían engullir enanas blancas y estrellas de neutrones, pero vemos montones de estrellas como estas en el firmamento, por lo que eso tampoco debe ser del todo cierto.

Creo que el lector entiende lo que quiero decir. Hay muchas variaciones del tema, pero el patrón general es universal: podemos idear escenarios altamente especulativos que parezcan peligrosos, aunque cuando los analizamos en detalle vemos que existen otros condicionantes que nos llevan a descartar las posibilidades más extremas. Pero como los científicos quieren ser precisos y tener en cuenta muchas posibilidades distintas, tienden a prestar demasiada

atención a todos los escenarios aparentemente espeluznantes para después tranquilizarnos explicándonos que todos ellos son altamente improbables. Cada vez que deberían haber dicho: «¡No!», lo que suelen decir es: «Probablemente no, la probabilidad es realmente muy pequeña», lo cual no tiene el mismo impacto. (Una excepción destacada es John Ellis, físico teórico en el CERN, que, cuando le preguntaron en *The Daily Show* cuál era la probabilidad de que el LHC destruyese el planeta, respondió: «Cero».)

Imagine que abre la nevera buscando un bote de salsa de tomate, con la intención de prepararse pasta para cenar. Un amigo alarmista le agarra antes de que pueda abrir la puerta y le dice: «¡Espera! ¿Estás seguro de que al abrir ese bote no liberarás un patógeno mutante que se extienda rápidamente y acabe con toda la vida sobre la Tierra?». Lo cierto es que no puede estar absolutamente seguro al cien por cien. Hay toda una panoplia de escenarios desastrosos cuya probabilidad es tan ridículamente pequeña que los ignoramos en nuestra vida cotidiana. Es concebible que al poner en marcha el LHC se desencadene una secuencia de acontecimientos que den lugar a la destrucción del planeta. Muchas cosas son concebibles, pero lo importante es si son razonables, y en este caso ninguna de ellas lo era.

Combatir a los agoreros resultó ser un buen entrenamiento para la comunidad física. El nivel de escrutinio público al que se ha sometido la búsqueda del Higgs no tiene precedentes. Los científicos, que se encuentran en su ambiente cuando discuten sobre ideas abstractas y refinadamente técnicas con otros científicos, han tenido que aprender a elaborar un mensaje claro y convincente de cara al mundo exterior. A la larga, eso solo puede tener consecuencias positivas para la ciencia.

FABRICAR LA SALCHICHA

Una de las principales ideas equivocadas que mucha gente tiene sobre los

resultados procedentes de los enormes experimentos de física de partículas tiene que ver con el recorrido desde que se obtienen los datos hasta que dichos resultados se hacen públicos. No es un camino fácil. En ciencia, la manera tradicional en que se comunican los resultados pasa por que los artículos científicos se publiquen en revistas basadas en el sistema de revisión por pares. Así es en el caso del ATLAS y el CMS, pero la complejidad de los experimentos implica que, prácticamente, los únicos árbitros competentes sean los propios miembros de las colaboraciones. Para hacer frente a este estado de cosas, cada experimento ha establecido un procedimiento extremadamente riguroso y exigente que debe seguirse antes de que los nuevos resultados puedan hacerse públicos.

Los miles de colaboradores en los experimentos del LHC no son, en su mayoría, empleados del CERN. El perfil típico del físico que trabaja allí es el de un estudiante, profesor, o postdoc (un puesto de investigador intermedio entre el doctorando y el profesor) de una universidad o laboratorio de cualquier lugar del mundo, que sin embargo pasa buena parte del año en Ginebra. Con mucha frecuencia, el primer paso de un artículo hacia su publicación implica que uno de estos físicos se haga una pregunta. Puede ser una pregunta perfectamente obvia, como: «¿Existe el bosón de Higgs?», o algo más especulativo: «¿Realmente se conserva la carga eléctrica?», «¿Existen más de tres generaciones de fermiones?», «¿Crean las colisiones de alta energía agujeros negros en miniatura?», «¿Existen dimensiones adicionales del espacio?». Preguntas que pueden venir inspiradas por una nueva propuesta teórica, por algún detalle en los datos existentes para el que no se encuentra explicación, o simplemente por las nuevas posibilidades que ofrece la propia máquina. Los experimentalistas son por lo general gente pragmática, al menos en su trabajo como científicos, de manera que suelen plantear preguntas cuya respuesta pueda encontrarse en la marea de datos que proporciona el LHC.

Los físicos a los que se les ocurre la cuestión suelen comentarla con sus amigos y colegas para valorar si merece la pena. Si son estudiantes, es probable

que lo consulten con su tutor, normalmente un profesor de su universidad de origen; si son profesores, puede que le pasen la idea a alguno de sus alumnos para que trabaje sobre ella. Cuando una idea parece prometedora, se eleva a algunos de los «grupos de trabajo» que existen en cada experimento, y que se especializan en distintas áreas de interés: «quarks top», «Higgs», «exóticas». («Exóticas» incluiría las partículas que predicen algunas de las teorías especulativas que circulan por ahí, o las que no predice absolutamente nadie.) Los grupos de trabajo estudian la idea, tras lo cual el «organizador» que dirige el grupo toma la decisión sobre si merece la pena continuar analizando esa cuestión en particular. Los experimentalistas mantienen detalladas páginas web con listas de los análisis que están en curso, para tratar de evitar la duplicidad de esfuerzos. De hecho, ese es el motivo por el que se inventó la World Wide Web.

Si la idea recibe la aprobación por parte del correspondiente grupo de trabajo, el análisis continúa. La vida de un físico actual combina el trabajo frente al ordenador con la asistencia a reuniones, normalmente a través de videoconferencia. Realizar análisis no es en modo alguno la única tarea de un experimentalista. También está el trabajo con la maquinaria, hacer «turnos» en la supervisión del funcionamiento del experimento, impartir (o recibir) clases, dar charlas, solicitar dinero de becas y, cómo no, participar en comités y otras mil absurdas minucias que forman parte inevitablemente de la vida académica. De vez en cuando, a los experimentalistas se les permite visitar a sus familias o ver la luz del Sol, pero estas frivolidades se restringen al máximo.

A estas alturas, los datos se han recopilado y están a buen recaudo en discos duros distribuidos por todo el mundo. El trabajo de un analista consiste en transformar esos datos en un resultado útil para la física. Pocas veces basta simplemente con darle a la manivela. Hay que hacer «descartes», y dejar de lado parte de los datos por irrelevantes, o por añadir ruido, a la pregunta en cuestión. (Por ejemplo, podríamos querer estudiar eventos en los que se producen dos chorros, pero solo si la energía total supera los 40 GeV y el ángulo entre ellos es de al menos 30 grados.) Muy a menudo es necesario programar software

especializado para tratar de superar los problemas específicos del problema en estudio. Los datos no son muy útiles si no se pueden comparar con alguna predicción teórica, por lo que se utilizan otros programas informáticos para estimar cómo deberían ser esos datos según distintos modelos. Incluso después de los descartes, sigue siendo necesario hacer una estimación del volumen de ruido de fondo que amenaza con ahogar nuestra preciada señal, lo cual conlleva un toma y daca entre los cálculos y otras mediciones. A lo largo del proceso, el grupo de trabajo recibe actualizaciones periódicas, tanto en forma de documentación escrita como de presentaciones por videoconferencia.

Finalmente, se obtiene un resultado. La siguiente tarea es convencer al resto de la colaboración de que el resultado es correcto (y no hay nada que guste más a un grupo de físicos malhumorados que demostrar los fallos en el análisis de otra persona). Cada proyecto debe obtener previamente una «preaprobación» por parte del grupo de trabajo, antes de que pueda ser aprobado por el conjunto de la colaboración. Existe un comité cuya única función es la de comprobar que el trabajo estadístico no contiene errores. El objetivo final es publicar un artículo en una revista científica, pero el artículo escrito debe circular entre los miembros de la colaboración antes de que el comité de publicación le dé su «bendición». Solo entonces puede enviarse a la revista.

Es comprensible que quienes no son científicos supusiesen que quien figura como autor del artículo de hecho lo había escrito. Desde luego, quien escribe el artículo es uno de los autores, pero todas las demás personas que contribuyen de manera significativa al trabajo que se describe figurarán en la lista de autores. En la física de partículas experimental, la tradición dicta que a cada miembro de la colaboración se le reconozca como autor de todos los artículos que el experimento produce. Ha leído bien: cada artículo que sale del CMS o el ATLAS tiene más de tres mil autores. Lo que es más, los autores aparecen por orden alfabético, por lo que para alguien de fuera resulta completamente imposible discernir quién ha hecho el análisis o quién ha escrito las palabras del artículo. El sistema no es ajeno a las controversias, pero contribuye a hacer que todos los

resultados que se publican cuenten con el respaldo del conjunto de la colaboración.

Por lo general, solo cuando el artículo se da por finalizado se comunican al público los análisis y se permite a los físicos que comenten el asunto en las charlas que den. La búsqueda del bosón de Higgs es un asunto especial, por supuesto: todo el mundo sabe desde hace años que era un objetivo primordial de ambos experimentos, y buena parte del trabajo preliminar ya se había realizado previamente, para facilitar que el tránsito desde los datos al anuncio público fuese lo más rápido posible. Aun así, hasta que los experimentos han verificado que los datos se han analizado correctamente, se procura por todos los medios que los resultados no se difundan.

Le pregunté a un físico si en el CMS, en general, se tenía conocimiento de los resultados que iba obteniendo el ATLAS, y viceversa. «¿Estás de broma? —me respondió con una risotada—. La mitad de la gente del ATLAS se acuesta con la mitad del CMS. ¡Por supuesto que se conocen!» A pesar de los niveles sobrehumanos de dedicación a sus cometidos, los físicos también son personas.

HAY ERRORES Y ERRORES

Las actualizaciones de diciembre sobre la búsqueda del Higgs que ofrecieron Fabiola Gianotti y Guido Tonelli no fueron los únicos seminarios del CERN que concitaron la atención del público en 2011. En septiembre de ese año, el físico italiano Dario Autiero anunció un resultado que acabaría siendo tristemente famoso: el de los neutrinos que en apariencia viajaban más rápido que la velocidad de la luz. El resultado procedía del experimento OPERA, que seguía la pista de neutrinos producidos en el CERN que recorrían más de 700 kilómetros bajo tierra hasta un detector situado en Italia. Como los neutrinos interactúan de forma tan débil, pueden atravesar muchos kilómetros de roca sólida sin apenas sufrir pérdida de intensidad, lo que hace de esta configuración una ventana

particularmente efectiva sobre sus propiedades.

El problema es evidente: se supone que nada viaja más rápido que la luz. Fue Einstein quien llegó a esta conclusión, que constituye uno de los cimientos de la física actual. Existen muchos argumentos de peso en favor de este principio, que se había verificado con anterioridad en innumerables experimentos de precisión. Si se demostrase que era falso, sería el resultado más importante de la física desde la irrupción de la mecánica cuántica. No es que tuviésemos que volver a empezar prácticamente desde cero, pero sin duda sería necesario definir nuevas leyes de la naturaleza. Una preocupante consecuencia sería que, si se podía ir más rápido que la luz, también se podría viajar hacia atrás en el tiempo, lo que inmediatamente dio pie a un nuevo género de chistes: «El camarero dice: “Aquí no servimos a leptones”. Un neutrino entra en un bar».

La mayoría de los físicos se mostraron de inmediato incrédulos. En *Cosmic Variance* escribí: «Lo que hay que saber de este resultado es 1. Es enormemente interesante de ser cierto. 2. Probablemente no lo es». Incluso los propios miembros de OPERA parecían dudar de las consecuencias de su hallazgo, y pidieron a la comunidad física que les ayudasen a entender dónde podía estar su error. Desde luego, incluso la más firme creencia teórica debe ceder ante un resultado experimental intachable. La pregunta era: ¿hasta qué punto este era fiable?

El hallazgo de OPERA era de una enorme relevancia estadística. La discrepancia entre teoría y observación superaba los seis sigmas, más que suficiente para afirmar que se trataba de un descubrimiento. A pesar de lo cual había muchos escépticos. Y los escépticos tenían razón. En marzo de 2012 otro experimento, llamado ICARUS, trató de replicar los resultados de OPERA, pero obtuvo algo muy distinto: los neutrinos respetaban escrupulosamente el límite de la velocidad de la luz.

¿Fue este uno de esos casos en los que simplemente tuvimos muchísima (mala) suerte y una sucesión de eventos improbables conspiraron para llevarnos por mal camino? En absoluto. La colaboración OPERA finalmente identificó una

importante fuente de error en su análisis original, un cable suelto que conectaba su reloj principal con un receptor de GPS. El cable defectuoso provocó un retardo en el tiempo que medía el detector, más que suficiente para explicar la anomalía original. Una vez que se arregló, el efecto desapareció.

La lección fundamental que se puede extraer del episodio es que no siempre basta con los sigmas. La estadística puede ayudarnos a determinar la probabilidad de que nuestros datos sean compatibles con la hipótesis nula, pero solo si partimos de datos fiables. Los científicos hablan de «errores estadísticos» (porque no tenemos datos suficientes, o porque existe una incertidumbre intrínseca aunque aleatoria en nuestras mediciones) y de «errores sistemáticos» (debidos a algún efecto desconocido que altera los datos uniformemente en un determinado sentido). No basta con que un resultado sea relevante desde un punto de vista estadístico para que sea cierto. Esta es una lección que los físicos que buscan el bosón de Higgs en el LHC tienen bien aprendida.

Hay otra cuestión más discutible: ¿hicieron bien los físicos de OPERA al comunicar públicamente sus resultados, llegando a convocar una rueda de prensa en el CERN para hacerlo? Desde el anuncio, la discusión al respecto ha sido intensa, con argumentos a favor y en contra. Por una parte, los responsables de OPERA sabían muy bien que lo que estaban afirmando era algo sorprendente, y pensaron que era preferible difundir la noticia ampliamente para que otros científicos pudiesen ayudarles a determinar si había habido algún error. Por otra parte, hubo mucha gente que pensó que el incidente fue perjudicial para la imagen pública de la ciencia, al dar pábulo en primera instancia a la posibilidad de que Einstein se hubiera equivocado para después reconocer que había sido un error. Puede que el interés del episodio sea meramente académico: quizá, en un mundo interconectado, donde las noticias viajan tan rápido, ya no sea posible que los grandes experimentos mantengan en secreto durante mucho tiempo resultados tan sorprendentes como este.

WEB 2.0

Tommaso Dorigo, físico del experimento CMS y bloguero en *A Quantum Diaries Survivor*, hizo una predicción atrevida en una charla en 2009 en la Conferencia Mundial de Periodistas Científicos: la primera noticia que el mundo exterior tendría sobre el descubrimiento definitivo del bosón de Higgs llegaría a través de un comentario anónimo en un blog. No acertó plenamente, pero casi.

Antes del bosón de Higgs, la última partícula elemental del Modelo Estándar en ser descubierta fue el quark top, identificado en el Tevatrón del Fermilab en 1995. Era la época de los primeros blogs (el término «weblog» data de 1997). No existían Facebook ni Twitter. Incluso MySpace, desde hace ya tiempo desahuciado por estar completamente pasado de moda, no se creó hasta 2003. Los físicos que trabajaban en el Tevatrón podían compartir cotilleos jugosos con otros físicos, pero el riesgo de que un gran descubrimiento se hiciera público antes de tiempo era reducido.

Las cosas han cambiado. Con la facilidad de comunicación que permite internet, cualquiera puede darle amplia difusión a una noticia, y los experimentos ATLAS y CMS cuentan con más de tres mil miembros cada uno. Por mucho que los responsables traten de mantener las cosas bajo control, la probabilidad de que guarden silencio todas y cada una de las personas que tienen conocimiento de un resultado importante es realmente bastante reducida.

Confieso que soy un entusiasta defensor de los blogs, aunque procuro no difundir rumores que la gente no quieren que se extiendan. Empecé a escribir un blog allá por 2004, en un sitio web personal llamado *Preposterous Universe*, y en 2005 me mudé al blog comunitario *Cosmic Variance*, que actualmente forma parte de la web de la revista *Discover*. Lo que me encanta de los blogs es que se pueden utilizar para cualquier propósito que su autor estime adecuado. Una amplia variedad de autores hace pleno uso de esta libertad. Incluso si nos limitamos a la minúscula subcultura de los blogs escritos por científicos o por escritores especializados en ciencia, los ejemplos van desde los más informales a

los rigurosos y matemáticos, pasando por los de noticias puras y duras, los satíricos o los de cotilleos. Nuestro objetivo en Cosmic Variance es compartir ideas y descubrimientos científicos interesantes con una amplia variedad de lectores, sin que eso limite nuestra libertad para divagar y pontificar sobre cualquier cosa que nos interese. Algunas de nuestras entradas más leídas estaban dedicadas al LHC, incluido el intento de bloguear en grupo y en directo la puesta en marcha en 2008 y los seminarios sobre el Higgs de 2012.

Uno de mis compañeros blogueros es John Conway, profesor de física en la Universidad de California en Davis y físico experimental en CMS. (JoAnne Hewett es otra.) El primer post que escribió Conway, titulado «Bump Hunting», ofrecía una visión perspicaz de en qué consiste el trabajo de un físico de partículas. A veces los datos pueden darte sorpresas, y no siempre es fácil saber si te has topado con un descubrimiento capaz de cambiar el mundo o si simplemente eres víctima de una fluctuación estadística.

Conway contó la historia de la búsqueda del bosón de Higgs en los datos del Fermilab (el LHC aún no estaba en funcionamiento) utilizando los canales que eran personalmente sus favoritos, aquellos en los que se produce un leptón tau. Estaban llevando a cabo un análisis ciego de los datos procedentes del experimento CDF del Tevatrón y finalmente llegaron a un punto en que estaban en disposición de abrir la caja para ver lo que contenía. Y la respuesta fue que... ¡había algo ahí dentro! Una pequeña pero inconfundible protuberancia en la tasa de producción de dos taus, algo del estilo de lo que cabría esperar de un bosón de Higgs con una masa de alrededor de 160 GeV. De solo 2,5 sigmas, pero digna de estudio. La mayoría de las pequeñas protuberancias se desvanecen, si bien todo descubrimiento real empieza por una pequeña protuberancia, por lo que es muy normal que todos los participantes estuviesen muy nerviosos. «Literalmente, se me puso la piel de gallina», recordaba.

En una segunda entrada sobre el asunto, Conway habló del análisis posterior y reveló algo que solo supo más tarde: el experimento hermano de CDF en el Fermilab, conocido como «D Zero», veía un déficit de eventos allí donde CDF

observaba un exceso. Lo cual rebajaba en gran medida la probabilidad de que hubiesen descubierto una nueva partícula. Los datos adicionales tampoco confirmaron la posibilidad de que allí hubiese una partícula oculta. Pero su historia es un magnífico ejemplo de la montaña rusa emocional en que a veces se convierte la vida de un científico experimental.

Por desgracia, no todo el mundo la interpretó así. Un número sorprendente alto de lectores tuvo la impresión de que el Fermilab había descubierto el bosón de Higgs o algo parecido, y de que Conway había decidido difundir la noticia publicándola en nuestro humilde blog en lugar de escribir un artículo científico o quizá ofrecer una rueda de prensa. Nuestros entusiastas lectores no fueron los únicos que se llevaron una impresión equivocada. Varios periodistas también le dieron crédito, lo que propició que apareciese en *The Economist* y *New Scientist*, entre otros. Para los físicos, fue una nueva lección: la opinión pública está tan ávida de oír cualquier cosa, lo que sea, sobre la búsqueda del Higgs, que hay que ser muy prudentes para asegurarnos de que la emoción se transmite adecuadamente, pero sin dar la impresión de que hemos descubierto más de lo que de hecho hemos encontrado.

PAPARAZZI DE LA FÍSICA

Los enormes aceleradores de partículas no son los únicos sitios donde podemos buscar nueva física. PAMELA (Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics: Equipo para la Exploración de la Antimateria/Materia y Estudio de la Astrofísica de Núcleos Ligeros) es un experimento italiano de detección de rayos cósmicos que orbita a baja altitud, montado sobre un satélite ruso (no militar) de reconocimiento. Uno de sus objetivos principales es la búsqueda de antimateria en los rayos cósmicos, principalmente en forma de positrones y antiprotones. Observar antimateria no es algo que deba sorprendernos: en el espacio exterior tienen lugar procesos de alta energía que

ocasionalmente producen antipartículas, igual que sucede en el LHC. Lo que sí es sorprendente es que PAMELA observase bastantes más positrones de los esperados. Esto podía tomarse como evidencia de algún proceso astrofísico que aún no comprendemos, por ejemplo algún fenómeno novedoso en las atmósferas de las estrellas de neutrones, o bien de física más allá del Modelo Estándar, como por ejemplo la aniquilación de partículas de materia oscura para dar lugar a un exceso de positrones. Se investigan varias alternativas, aunque a medida que pasa el tiempo las opciones astrofísicas parecen cada vez más prometedoras.

Lo que puede que sea aún más sorprendente es cómo se difundieron las noticias sobre el sorprendente resultado de PAMELA. A menudo sucede que un experimento tiene resultados preliminares, aún no del todo maduros para publicarlos o distribuirlos, pero sí lo suficiente como para mostrárselos a los colegas en una conferencia. Eso es lo que sucedió con PAMELA en la Conferencia Internacional de Física de Altas Energías, en Filadelfia, en septiembre de 2008. Mirko Boezio, físico de PAMELA, mostró fugazmente una gráfica que reflejaba un exceso de positrones, resultado que aún no se había incorporado a ninguna publicación.

Pero no fue lo suficientemente fugaz. Mientras aparecía la gráfica, un joven teórico llamado Marco Cirelli, que se encontraba entre el público, aprovechó para tomar una fotografía con su cámara digital. De vuelta en casa, junto con su colaborador Alessandro Strumia escribió un artículo en el que proponían un nuevo modelo para la materia oscura que podría explicar el exceso, y lo remitió al archivo de física en el servidor <http://arxiv.org>, desde donde se distribuyó al mundo entero. En su artículo incluyeron gráficas en las que comparaban la predicción teórica de su modelo con los datos que habían extraído de la fotografía de la charla en la conferencia, con el siguiente pie de foto: «Para cumplir con la política de publicación, los datos preliminares relativos a los flujos de positrones y antiprotones representados en nuestras figuras han sido extraídos de una fotografía de las transparencias que se tomó durante la charla».

Bienvenidos al nuevo mundo. Se trata claramente de una zona gris. Alguien

que formase parte de la colaboración podría decir que si los datos aún no están en disposición de ser publicados no deberían utilizarse en un análisis teórico. A lo que un miembro del público podría responder que si los datos no están listos tampoco se deberían mostrar en público en una charla. Piergiorgio Picozza, físico italiano responsable de PAMELA, estaba «muy, pero que muy enfadado» por cómo se habían obtenido y utilizado los datos. Pero Cirelli insiste en que obtuvo permiso de los físicos de PAMELA presentes en la conferencia: «Le preguntamos a la gente de PAMELA [que estaba allí] y nos dijeron que no había problema».

En la era de Facebook, como muchos adolescentes saben bien, cualquier cosa que compartas con alguien es como si la compartieses con todo el mundo. La tecnología ha hecho que el esfuerzo necesario para compartir información sea mínimo, con independencia de lo oficial o fiable que sea dicha información. Como dijo Joe Lykken, refiriéndose a otro rumor: «Antes de los blogs, este tipo de rumores quizá habrían circulado entre varias decenas de físicos. Ahora, con los blogs, incluso los físicos que estudian la teoría de cuerdas y no saben ni cómo deletrear “Higgs” tienen acceso inmediatamente a información privilegiada sobre los datos».

SUSURROS

Los rumores no siempre son positivos. En abril de 2011, alguien, mediante un comentario anónimo en el blog de Peter Woit, Not Even Wrong, filtró una circular interna de ATLAS, del equipo de Sau Lan Wu en Wisconsin. Su contenido era explosivo, de ser cierto: sólidas evidencias de la desintegración en dos fotones de un bosón similar al Higgs. Pero era demasiado bueno para ser verdad: para obtener una señal de esa intensidad con la relativamente ínfima cantidad de datos de que disponían en ese momento, la tasa de desintegración del Higgs debería ser treinta veces mayor que la predicha por el Modelo Estándar.

No era imposible, pero tampoco era nada que nadie esperase. Como era de suponer, una vez que ATLAS publicó los resultados debidamente aprobados, la señal había desaparecido.

Este incidente refleja un inconveniente de los blogs. Las comunicaciones internas como esta son básicas para una gran colaboración: se escriben continuamente, como parte del proceso de maduración de un análisis para dar lugar a un resultado aprobado que hemos descrito antes. Ni siquiera quienes las escriben tienen por qué creer necesariamente que el resultado es real, lo único que hacen es señalar que algo es digno de un mayor escrutinio. Y eso está bien, siempre que se haga dentro de los límites de la colaboración. Si se hace público antes de ser aprobado, existe un grave riesgo de que sea malinterpretado, lo que puede en última instancia socavar la confianza de la sociedad en los resultados oficiales. La propia Wu estaba furiosa: «La filtración fue completamente contraria a la ética e irresponsable. [...] Ha dañado la libertad de circulación interna de estudios por escrito entre los colaboradores. Para mí, es un asunto muy triste».

En junio de 2012, el CMS y el ATLAS comenzaron a estudiar minuciosamente los datos que habían podido recopilar a lo largo del año. Desde los seminarios de diciembre de 2011, todos sabían que había indicios de un Higgs de 125 GeV, por lo que, comprensiblemente, la curiosidad era máxima. En cuanto comenzó el análisis, los rumores empezaron a circular. Desde mucho tiempo atrás, estaba previsto que los datos actualizados sobre la búsqueda del Higgs se presentasen en julio en la ICHEP, en Melbourne. El alboroto mediático aumentó cuando el CERN anunció que no esperarían a Melbourne, sino que convocarían unos seminarios especiales inmediatamente antes en Ginebra. ¿Por qué habrían de hacer algo así si no fuesen a anunciar algo grande?

Las cosas se complicaron tanto que Fabiola Gianotti, en un correo electrónico a Dennis Overbye, periodista del *New York Times*, pidió: «Por favor, no os creáis lo que dicen los blogs». Pero hay bloggers de todas las clases, y algunos trataron de detener la oleada, en lugar de contribuir a ella. Michael Schmitt,

físico en la Universidad Northwestern y miembro del CMS, escribió en su propio blog, Collider:

Le debo lealtad a mi experimento, en particular a la gente que ahora mismo está realizando los análisis y verificando los resultados, así como a los responsables que tienen que definir la estrategia y tomar decisiones difíciles. No merece la pena conseguir un poco de notoriedad para mi blog si es a costa de importunar a todas estas personas.

Lo que es innegable es que, de entre las seis mil personas que suman entre los dos experimentos, alguien va a caer en la tentación de irse de la lengua. Una de las quejas más frecuentes contra los blogs no es que se publiquen los resultados antes de tiempo, sino que los resultados ni siquiera existen. El análisis lleva su tiempo, y normalmente se realiza a un ritmo febril justo hasta el momento de dar la charla o de enviar el artículo para su publicación.

Mientras tanto, otros aprovecharon la emoción del momento para divertirse. El 20 de junio, varios usuarios de Twitter empezaron a pasarse mensajes satíricos sobre el Higgs. El hashtag #HiggsRumors llegó incluso a ser brevemente trending topic en Twitter, un honor normalmente reservado a noticias relacionadas con *Jersey Shore* o Lady Gaga. Jennifer Ouellette, escritora científica y bloguera (y también mi mujer), recopiló algunos de los mejores tuits en una entrada en su blog.

@drskyskull: He oído que el bosón de Higgs una vez disparó a un hombre solo para verlo morir. #HiggsRumors

@StephenSerjeant: Chuck Norris ha descubierto el bosón de Higgs antes que ATLAS y CMS. #HiggsRumors

@treelobsters: Durante el solsticio de verano, un bosón de Higgs puede mantenerse en equilibrio indefinidamente. #HiggsRumors*

@tomroud: La partícula de Dios en realidad es atea. #HiggsRumors

Mi aportación fue la siguiente: «Little Mikey, de los anuncios de cereales

LIFE, murió tras comer bosones de Higgs y beber refresco al mismo tiempo. #HiggsRumors». Lo cual probablemente dice mucho de mis habilidades como cómico (y de mi edad).

HOLLYWOOD Y LA CIENCIA

Los Ángeles es una ciudad industrial Su industria es la del entretenimiento. A principios de 2007, al poco de trasladarme a vivir aquí, recibí una llamada inesperada. Era de Imagine Entertainment, la productora dirigida por Ron Howard y Brian Grazer (*Apollo 13*, *Una mente maravillosa*, *El código Da Vinci*). Estaban planificando el rodaje de *Ángeles y demonios*, basada en el libro de Dan Brown, que incluía varias escenas importantes en el CERN, y se preguntaban si estaría dispuesto a pasarme por sus oficinas de Beverly Hills para hablar sobre física de partículas.

Les dije que probablemente podría hacerles un hueco en mi agenda. Fue entonces cuando tomé conciencia de un hecho poco conocido: a Hollywood le encanta la ciencia.

Es justo lo contrario del estereotipo habitual, según el cual las películas y las series de televisión suelen cometer garrafales errores científicos, y retratan a los científicos o bien como unos memos antisociales o bien como unos genios locos empeñados en dominar el mundo. Desde luego, hay mucho de eso, pero entre numerosos guionistas y directores también existe un interés genuino por utilizar la ciencia adecuadamente para mejorar las historias que quieren contar. Howard y Grazer mostraron verdadero interés por la cosmología, la antimateria y el bosón de Higgs, y pasamos un entretenido almuerzo compartiendo ideas sobre distintas maneras de introducir la física en la película. Más adelante, mi mujer, Jennifer, se convertiría en la primera directora del Science and Entertainment Exchange, un proyecto de la Academia Nacional de Ciencias para tratar de

mejorar la interacción entre los científicos y Hollywood. A través de esta iniciativa pude conocer a directores como Ridley Scott, Michael Mann y Kenneth Branagh, todos ellos interesados en aprender más sobre dimensiones adicionales, viajes en el tiempo y el big bang. Las películas de gran presupuesto de Hollywood no pretenden ser documentales ni anuncios de promoción pública de la ciencia; la narración es lo primero, y las sugerencias de los científicos no siempre acaban reflejándose en el producto final. Pero muchos reputados profesionales que en la gran pantalla se dedican a contarnos cuentos de hadas aprecian las maravillas de los descubrimientos científicos en los que se inspiran.

Por su parte, la ciencia no es contraria a recurrir a Hollywood para promover su propia causa. La escritora científica Kate McAlpine, que pasó tiempo en el CERN trabajando en el ATLAS, en 2008 publicó un vídeo en YouTube titulado *Large Hadron Rap*, en el cual aparecían varios físicos bailando junto a los experimentos del LHC mientras McAlpine rapeaba una letra inspirada en la física sobre un ritmo de fondo:

*Veintisiete kilómetros de túnel subterráneo
Pensado y diseñado para que circulen los protones
Un círculo que atraviesa Suiza y Francia
Sesenta naciones contribuyen al progreso científico
Dos haces de protones girando sin cesar, recorren el anillo
Hasta que en el núcleo de los detectores se les hace chocar
Y toda energía concentrada en tan poco espacio
Se transforma en masa, partículas creadas a partir del vacío
Y entonces...*

Siete millones de visitas después, está claro que el vídeo tocó alguna fibra. En YouTube no escasean los vídeos caseros sobre cualquier tema imaginable. Por algún motivo, este destacó entre la multitud. Lo cual debería recordarnos lo mucho que puede interesarse la opinión pública por alguna esotérica cuestión científica si se le presenta de una manera divertida.

El proyecto más ambicioso en ese sentido ha sido el que ideó David Kaplan,

un físico de partículas de la Universidad Johns Hopkins. En su trabajo normal, Kaplan construye modelos que pueden probarse en el LHC y en otros experimentos, pero desde siempre le ha interesado la realización. De sus tiempos de instituto, recuerda la falta de motivación que le llevó a ni tan siquiera solicitar el ingreso en la universidad. Su hermana, sin decírselo a él, envió una solicitud a la Universidad Chapman, en California. Para sorpresa general, lo aceptaron y pasó un año allí estudiando cine. La experiencia no le convenció, y acabó cambiándose a la Universidad de California en Berkeley y estudiando física. No empezó el doctorado inmediatamente, en parte porque sus notas en Berkeley eran tan malas que no pensó que nadie le fuese a escribir una carta de recomendación. Lo que hizo Kaplan fue trasladarse a Seattle, y ganarse un dinero extra dando clases particulares a estudiantes de física de la Universidad de Washington. Después de que un buen número de sus alumnos lo prefiriesen a él como profesor antes que a los doctorandos de la Universidad de Washington, finalmente comenzó sus estudios de posgrado allí. Bien está lo que bien acaba: ahora Kaplan es uno de los referentes de una nueva generación de físicos de partículas que están intentando que la física supere el Modelo Estándar.

Cuando se aproximaba la era del LHC, Kaplan tomó conciencia de lo especial que era este momento y comentó con sus amigos su impresión de que estábamos en un punto de inflexión en la historia de la ciencia, quizá incluso de la historia del progreso intelectual de la humanidad. Si el LHC encuentra algo interesante, nos conducirá por una nueva senda de descubrimientos. Si no, el coste prohibitivo de la física moderna puede hacer que este sea el último gran acelerador que se construya jamás. Kaplan estaba convencido de que alguien debería documentar minuciosamente este espectáculo trascendental. Su idea era entrevistar a numerosos físicos de partículas, —tanto a los veteranos que habían construido sus carreras alrededor de determinadas ideas sobre el funcionamiento de la naturaleza y las habían visto verificadas o descartadas como a los jóvenes que tendrían que lidiar con lo que fuese que el LHC revelase o no— y plasmar sus conversaciones en un libro.

El problema es que, incluso cuando se trata de artículos científicos, como escritor Kaplan es tremendamente lento. La solución era evidente: en lugar de escribir un libro, haría una película. Así nació *Particle Fever* (su título provisional).

Recién incorporado al profesorado, Kaplan había recibido una pequeña beca de la Fundación Alfred P. Sloan. Normalmente, este tipo de becas se emplean en la compra de ordenadores, en pagar algún viaje o en proporcionar algún tipo de apoyo a los estudiantes de doctorado. Pero Kaplan consiguió que un director de televisión se interesase por su idea y ambos utilizaron el dinero para crear un corto de cinco minutos que a su vez le sirviese para recaudar la importante suma de dinero necesaria para financiar un largometraje documental. Su presupuesto inicial fue de 750.000 dólares (desde entonces, ha aumentado) y entonces empezó el trabajo de verdad: recaudar fondos, contratar editores y guionistas, recaudar fondos, entrevistar a los físicos, y recaudar fondos. Distribuyeron pequeñas cámaras de alta definición a varios físicos del CERN, que pudieron así grabar momentos cruciales, como la puesta en marcha en 2008 o el accidente que se produjo poco después. El propio Kaplan ha dedicado buena parte de su tiempo al proyecto. No recibe ningún salario por ello, y en un momento dado su familia tuvo que prestarle 50.000 dólares para evitar que se hundiese.

Pero el interés que ha suscitado es inmenso. La oficina de desarrollo de la Johns Hopkins mostró un fragmento a la junta directiva de la universidad, uno de cuyos miembros realizó una inversión en el proyecto en el acto. A la Fundación Nacional para la Ciencia (NSF), que financia buena parte de la investigación básica en Estados Unidos y arenga continuamente a los científicos para que se involucren más en la divulgación al gran público, le encantó ver que uno de sus investigadores se lo estaba tomando en serio y le ofreció una jugosa financiación. A Walter Murch, un respetado editor de Hollywood que había trabajado con George Lucas y Francis Ford Coppola y ha obtenido varios premios Oscar, le impresionó la película y ofreció sus servicios con una sustancial rebaja en sus emolumentos.

A lo largo del proceso, el objetivo de Kaplan fue el de reflejar el fervor quijotesco que incita a los científicos a tratar de entender el universo un poco mejor de lo que nadie antes lo hubiese comprendido. Desde una perspectiva emocional, es mucho lo que hay en juego: la física es una ciencia experimental, y los teóricos más brillantes de todo el mundo reciben muy poco reconocimiento si resulta que la teoría que proponen no coincide con el camino escogido por la naturaleza. En palabras de Kaplan:

Al fin y al cabo, es un ejercicio extraordinariamente heroico. Y está cargado de egos, de intensidad, incluso de excesos de confianza. Pero lo que uno llega a comprender es que la gente se engaña. Para poder trabajar tanto como lo hacen y poder seguir adelante, los científicos crean un mundo en sus cabezas, a sabiendas de que podría ser un fracaso total. Toda su carrera podría acabar en el retrete y haber sido completamente irrelevante.

Cuando escribo esto, a mediados de 2012, *Particle Fever* se aproxima a su finalización, y el equipo confía en que la seleccionen para el Festival de Cine de Sundance, en enero de 2013. Como corresponde, son tremendamente ambiciosos y confían en poder estrenarla en los cines y llevar así el LHC al gran público. Tanto si lo consiguen como si no, lo que sí habrán hecho es crear un documento único, testimonio notable de la excitación y el nerviosismo de los físicos en el amanecer de la era del LHC.

Y David Kaplan podrá volver a dedicarse por completo a la física. Por muy interesante y novedoso que haya sido el proceso, no parece probable que cambie de trabajo en un futuro próximo:

Hacer una película es una experiencia terrible. Carece por completo de lógica, hay mucho ego, y la gente se enzarza en discusiones sin ningún sentido en absoluto. Lo odio... Y adoro la física.

Sueños del Nobel

Donde referimos la fascinante historia de cómo se ideó el mecanismo «de Higgs» y reflexionamos sobre cómo pasará a la posteridad.

Año 1940, Alemania acababa de invadir Dinamarca. Niels Bohr, uno de los padres fundadores de la mecánica cuántica, director del Instituto de Física Teórica de Copenhague, estaba en posesión de unos valiosos objetos de contrabando que necesitaba esconder de los nazis a toda costa: dos medallas de oro de las que reciben los galardonados con el premio Nobel. ¿Cómo podría evitar que las encontrase el ejército que se acercaba?

Bohr había recibido el premio Nobel en 1922, pero ninguna de las medallas le pertenecía. La suya la había subastado un tiempo atrás para ayudar a las fuerzas de la Resistencia en Finlandia. Estas eran propiedad de Max von Laue y James Franck, dos físicos alemanes que habían sacado las medallas, que llevaban sus nombres grabados, del país ilegalmente para mantenerlas fuera del alcance de los nazis. Bohr recurrió a su amigo el químico George de Hevesy, que tuvo una idea brillante: las disolverían en ácido. El oro no se descompone con facilidad, por lo que los científicos utilizaron agua regia, una solución altamente corrosiva de ácido nítrico y ácido clorhídrico, famosa por su capacidad para disolver los metales «nobles». Sumergidas en el agua regia durante toda una tarde, las medallas del Nobel se disociaron progresivamente en sus átomos individuales, que permanecieron suspendidos en la solución. Cualquier soldado que rastree el lugar buscando indicios de tesoros ocultos no encontraría más que un par de vulgares frascos con compuestos químicos, disimulados entre cientos de

recipientes similares.

La estratagema funcionó. Después de la guerra, los científicos lograron recuperar el oro haciendo que precipitasen los átomos de la solución de De Hevesy. Bohr remitió el metal a la Real Academia Sueca de las Ciencias, en Estocolmo, que pudo volver a fundir las medallas de Von Laue y Franck. El propio De Hevesy, que huyó a Suecia en 1943, obtuvo el premio Nobel en Química en 1944 (no por descubrir nuevas técnicas para ocultar objetos de contrabando, sino por la utilización de isótopos para seguir la evolución de las reacciones químicas).

Por si no ha quedado claro: la gente se toma el premio Nobel muy en serio. A finales del siglo XIX, el químico Alfred Nobel, inventor de la dinamita, instituyó los premios en Física, Química, Fisiología o Medicina, Literatura y el de la Paz, que se han otorgado anualmente desde 1901. (El premio en Economía, que se creó en 1968, lo gestiona otra organización.) Nobel falleció en 1896, y sus albaceas se llevaron una sorpresa al saber que había donado el 94 por ciento de su considerable fortuna para la creación de los premios.

En los años transcurridos desde entonces, los premios Nobel se han ganado el prestigio universal y el máximo reconocimiento científico. Lo cual no es exactamente lo mismo que «logro» científico: los Nobel se rigen por criterios muy específicos, que suscitan interminables discusiones sobre hasta qué punto los premios se corresponden con los descubrimientos científicos verdaderamente importantes. El testamento original de Nobel pretendía reconocer «a aquellos que, durante el año precedente, hayan realizado el mayor beneficio a la humanidad», y, con el premio en Física en particular, «a la persona o personas que hayan llevado a cabo el “descubrimiento” o la “invención” más importantes en el campo de la física». En cierta medida, estas instrucciones sencillamente son ignoradas. Después de que varios de los primeros premios recayesen en hallazgos que más adelante se revelaron como erróneos, ya nadie espera que los premios reconozcan el trabajo realizado en el año precedente. Y, lo que es más

importante, realizar un «descubrimiento» no es lo mismo que obtener reconocimiento como uno de los más destacados científicos del mundo. Hay descubrimientos a los que se llega en cierta medida por accidente, por gente que después acaba dejando ese campo. Y hay científicos que realizan un excelente trabajo a lo largo de sus carreras, pero que no tienen a su nombre ningún descubrimiento extraordinario digno de un Nobel.

Otros de los criterios limitan mucho las opciones del comité del Nobel. Los premios no se otorgan a título póstumo, aunque si un galardonado fallece entre el momento en que se toma la decisión y cuando se anuncia recibe el premio igualmente. Y, algo muy importante en el caso de la física, no puede haber más de tres ganadores en un año. A diferencia del premio de la Paz, por ejemplo, el de Física no se concede a una organización o un equipo, sino exclusivamente a tres individuos como máximo. Lo cual constituye una complicación añadida en la era de la Gran Ciencia.

Cuando se trata de contribuciones teóricas, no basta con ser inteligente, ni siquiera con estar en lo cierto: además, la teoría debe confirmarse experimentalmente. La contribución más importante de Stephen Hawking a la ciencia es la idea de que los agujeros negros emiten radiación debida a los efectos de la mecánica cuántica. La inmensa mayoría de los físicos creen que es así, pero de momento es un resultado puramente teórico: no hemos observado la evaporación de ningún agujero negro, ni existe ninguna manera prometedora de hacerlo con la tecnología de que disponemos actualmente. Es muy probable que Hawking nunca gane el premio Nobel, a pesar de que sus contribuciones son verdaderamente impresionantes.

Para las personas ajenas a la ciencia, a veces puede parecer que la única finalidad de la investigación es ganar el premio Nobel. Pero no es así. El Nobel inmortaliza momentos importantes de la ciencia, pero los propios interesados reconocen que el progreso científico es como un rico tapiz hecho a base de innumerables contribuciones, grandes y pequeñas, que se van entretejiendo a lo largo de los años. A pesar de lo cual, reconozcámoslo, ganar el Nobel es algo

muy importante, y los físicos son muy conscientes de cuáles son los descubrimientos que podrían ser merecedores de él en algún momento.

Ciertamente, el descubrimiento del bosón de Higgs es un logro merecedor del premio Nobel. De hecho, la invención de la teoría que predijo la existencia del Higgs también lo es, sin duda. Pero eso no implica necesariamente que lo vayan a recibir. ¿Quién obtendría el galardón? En última instancia, lo que importa es la ciencia, no los premios, pero son una buena excusa para adentrarnos en la fascinante historia de las ideas que están detrás del bosón de Higgs y de cómo los físicos decidieron ir en su busca. El objetivo de este capítulo no es ofrecer la versión definitiva de la historia, ni determinar quién merece tal o cual premio. Al contrario: al analizar el desarrollo de estas ideas en el tiempo, debería resultar evidente que en el mecanismo de Higgs, como en muchas otras grandes ideas de la ciencia, fueron imprescindibles muchos pasos previos antes de dar con la respuesta final. Si intentásemos trazar una línea definida entre las tres personas (como máximo) que merecerían el premio y las muchas otras que se quedarían sin él quizá conseguiríamos un buen titular, aunque sería a costa de violentar inevitablemente la realidad del progreso científico.

En este capítulo voy a intentar contar la historia de manera correcta, aunque las limitaciones de espacio harán que el recuento sea necesariamente incompleto. No obstante, para la historia los detalles a menudo son importantes. Por lo tanto, en comparación con el resto del libro, este capítulo profundizará algo más en los detalles técnicos. No pasa nada si se lo salta, siempre que no le importe perderse una historia plena de física fascinante y emocionantes dramas humanos.

SUPERCONDUCTIVIDAD

En el capítulo 8 hemos explorado la profunda conexión existente entre las simetrías y las fuerzas de la naturaleza. Si tenemos una simetría «local» o «de gauge» —que opera independientemente en cada punto del espacio—, con ella

viene también necesariamente un campo de conexión, y son estos campos de conexión los que dan lugar a las fuerzas. Así es como funcionan tanto la gravedad como el electromagnetismo y, en los años cincuenta, Yang y Mills propusieron una manera de extender la idea a las demás fuerzas de la naturaleza. El problema, como Wolfgang Pauli señaló impetuosamente, es que la simetría fundamental siempre está asociada a partículas bosónicas sin masa. Esa es parte de la fuerza de las simetrías: imponen rigurosas restricciones sobre las propiedades que pueden tener las partículas. La simetría que subyace en el electromagnetismo, por ejemplo, implica que la carga eléctrica se conserva estrictamente.

Pero las fuerzas que son transportadas por partículas sin masa —hasta donde se sabía por aquel entonces— tienen alcance infinito y debería ser muy fácil detectarlas. La gravedad y el electromagnetismo son los ejemplos obvios, mientras que las fuerzas nucleares parecen muy distintas. Actualmente somos conscientes de que las interacciones fuerte y débil también son fuerzas de tipo Yang-Mills, en las que las partículas sin masa están ocultas a nuestros ojos por distintos motivos: en la fuerza nuclear fuerte, los gluones carecen de masa pero están confinados en el interior de los hadrones, mientras que en la fuerza débil los bosones W y Z adquieren masa por una ruptura espontánea de simetría.

En 1949, el físico estadounidense Julian Schwinger había planteado un argumento según el cual las fuerzas basadas en simetrías siempre llevarían asociadas partículas sin masa. No obstante, siguió dándole vueltas al asunto y en 1961 se dio cuenta de que su argumento hacía aguas: contenía un fallo que hacía posible que los bosones de gauge tuviesen masa. No estaba del todo seguro de cómo podía suceder en la práctica, pero escribió un artículo en el que ponía de manifiesto su error anterior. Schwinger era famoso por la elegancia y precisión tanto de su estilo personal como de su trabajo en física. Lo cual contrastaba con Richard Feynman, con quien Schwinger y Sin-Itiro Tomonaga compartieron el premio Nobel en 1965. Feynman era conocido por su personalidad impetuosa e informal y por su aproximación profundamente intuitiva a la física, mientras que

Schwinger era indefectiblemente meticuloso y cuidadoso. Cuando escribió un artículo en el que señalaba que existía un error en un razonamiento ampliamente aceptado por la comunidad física, la gente se lo tomó en serio.

La pregunta seguía siendo: ¿qué es lo que podría hacer que los bosones que comunican las fuerzas adquiriesen masa? La respuesta llegó desde donde muy pocos lo esperaban: no fue desde la física de partículas, sino desde la física de la materia condensada, el estudio de los materiales y sus propiedades. En concreto, de las ideas que tomaron prestadas de la teoría de los superconductores, esos materiales que no presentan resistencia a la electricidad, como los que constituyen los imanes gigantes del LHC.

La corriente eléctrica consiste en el flujo de electrones a través de un medio. En un conductor normal, los electrones chocan continuamente con los átomos y con otros electrones, que ofrecen resistencia al flujo. Los superconductores son materiales en los que, cuando la temperatura es suficientemente baja, la corriente puede fluir sin obstáculos. La primera buena teoría de los superconductores la propusieron los físicos soviéticos Vitali Ginzburg y Lev Landau en 1950. Su idea era que existía un tipo especial de campo que permeaba el superconductor y actuaba de tal manera que el fotón, que normalmente carecía de ella, adquiriría masa en su interior. No pensaban necesariamente en un nuevo campo fundamental de la naturaleza, sino en el movimiento colectivo de electrones, átomos y campos electromagnéticos, de manera análoga a como una onda sonora no procede de las vibraciones de un campo fundamental, sino del movimiento colectivo de los átomos del aire, que chocan unos con otros.

Aunque Landau y Ginzburg proponían que había algún tipo de campo responsable de la superconductividad, no especificaban en qué consistía realmente dicho campo. Ese paso lo dieron los físicos estadounidenses John Bardeen, Leon Cooper y Robert Schrieffer, que en 1957 desarrollaron la que se conoce como «teoría BCS» de la superconductividad. La teoría BCS es uno de los hitos de la física del siglo xx, y merece sin duda todo un libro distinto de

este.

BCS tomó prestada una idea de Cooper, según la cual, a temperaturas muy bajas, las partículas se asocian en pares. Son estos «pares de Cooper» los que componen el misterioso campo que proponían Landau y Ginzburg. Mientras que un único electrón encontraría resistencia al chocar repetidamente contra los átomos a su alrededor, un par de Cooper puede combinarse ingeniosamente de manera que cualquier impacto que sintiese uno de los electrones se compensaría con un impulso igual y de sentido contrario en el otro (y viceversa). En consecuencia, los electrones emparejados se deslizarían sin obstáculos a través del superconductor.

Esto está directamente relacionado con el hecho de que los fotones poseen una masa efectiva en el interior del superconductor. Cuando las partículas carecen de masa, su energía es directamente proporcional a su velocidad, y puede tomar valores que van desde cero a cualquier cifra imaginable. Las partículas con masa, por el contrario, poseen una energía mínima: su energía en reposo, dada por $E = mc^2$. Cuando los electrones en movimiento sufren los empujones de los átomos y de los demás electrones del material, su campo eléctrico se agita ligeramente, lo cual produce fotones de muy baja energía que apenas se dejan notar. Esta continua emisión de fotones es la que propicia que los electrones pierdan energía y velocidad, lo cual hace que la corriente se diluya. Puesto que los fotones adquieren masa en las teorías de Landau-Ginzburg y BCS, para producirlos se requiere una determinada energía mínima. Los electrones que no poseen energía suficiente no pueden crear ningún fotón, y por tanto no pueden perder energía: los pares de Cooper fluyen a través del material con resistencia cero.

Desde luego, los electrones son fermiones, no bosones. Pero, cuando se asocian en los pares de Cooper, el resultado es un bosón. Se han definido los bosones como los campos que transmiten las fuerzas, por contraposición con los fermiones, que son campos de materia que ocupan espacio. Como explico en el apéndice 1, los campos tienen una propiedad llamada «espín» que también

distingue entre bosones y fermiones. Todos los bosones poseen espines cuyo valor es un número entero: 0, 1, 2... Los de los fermiones, por su parte, son números semienteros: $1/2$, $3/2$, $5/2$... El electrón es un fermión con espín igual a $1/2$. Cuando las partículas se asocian, sus espines pueden o bien sumarse o bien restarse, de manera que el espín de un par de electrones puede tomar valores 0 o -1 , el propio de un bosón.

Esta introducción no hace en absoluto justicia a los entresijos de las teorías de Landau y BCS, que nos cuentan una vistosa historia con múltiples tipos de partículas moviéndose al unísono de forma intrínsecamente mecanocuántica. Por lo que a nosotros respecta, el mensaje que debe quedar claro es sencillo: un campo bosónico que se extienda por todo el espacio puede proporcionar masa a los fotones.

RUPTURA ESPONTÁNEA DE SIMETRÍA

Esta última afirmación se parece bastante a la idea del Higgs. Pero aún quedaba un rompecabezas por resolver: ¿cómo reconciliamos la idea de que los fotones poseen masa en el interior de un superconductor con la convicción de que la simetría fundamental del electromagnetismo obliga a que el fotón carezca de ella?

Varias personas abordaron este problema, entre las cuales estaban el físico estadounidense Philip Anderson, el físico soviético Nikolái Bogoliubov, y el físico japonés-estadounidense Yoichiro Nambu. Resultó que la clave radicaba en que la simetría existía realmente, pero estaba oculta por un campo que tomaba un valor no nulo en el superconductor. En la jerga propia de este fenómeno, decimos que la simetría «se rompe espontáneamente»: la simetría está en las ecuaciones básicas, pero la solución concreta que nos interesa de dichas ecuaciones no tiene un aspecto muy simétrico.

Yoichiro Nambu, a pesar de obtener el premio Nobel en 2008 y de hacer

recibido muchos otros reconocimientos a lo largo de los años, sigue siendo relativamente un desconocido fuera de la física. Es una lástima, porque sus contribuciones son comparables a las de otros colegas más famosos. No solo fue uno de los primeros en comprender la ruptura espontánea de simetría en la física de partículas, sino que también fue el primero en proponer que los quarks poseen color, en sugerir la existencia de los gluones y en señalar que ciertas propiedades de las partículas se podían explicar si imaginábamos que las partículas eran en realidad diminutas cuerdas, punto de partida de la teoría de cuerdas. Los físicos teóricos admiran los logros de Nambu, pero su tendencia natural es a rehuir los focos.

El despacho de Nambu estaba frente al mío cuando yo daba clase en la Universidad de Chicago. No interactuamos mucho, pero cuando lo hicimos fue en todo momento gentil y educado. Nuestro encuentro más importante se produjo cuando llamó a mi puerta esperando que pudiese ayudarlo con el sistema de correo electrónico de los ordenadores del grupo de los teóricos, que tenía tendencia a tomarse un respiro en el momento menos esperado. No fui de mucha ayuda, pero se lo tomó con filosofía. Peter Freund, otro teórico en Chicago, describe a Nambu como un «mago»: «De pronto saca toda una serie de conejos de su chistera y, antes de que te quieras dar cuenta, los conejos se reordenan en una formación completamente novedosa, y por Dios que se mantienen en un equilibrio imposible sobre sus colas de peluche». Sin embargo, su exquisito sentido de la etiqueta le abandonó cuando fue nombrado brevemente director del departamento: como era reacio a responder explícitamente con un «no» ante cualquier pregunta, indicaba su desaprobación mediante una pausa antes de contestar que «sí». Lo cual causó cierta consternación entre sus colegas cuando se dieron cuenta de que sus solicitudes en realidad no habían sido aceptadas.

Después de que se propusiese la teoría BCS, Nambu comenzó a estudiar el fenómeno desde el punto de vista de un físico de partículas. Destacó la importancia fundamental de la ruptura espontánea de simetría y empezó a plantearse si habría manera de ampliar su ámbito de aplicación. Uno de los

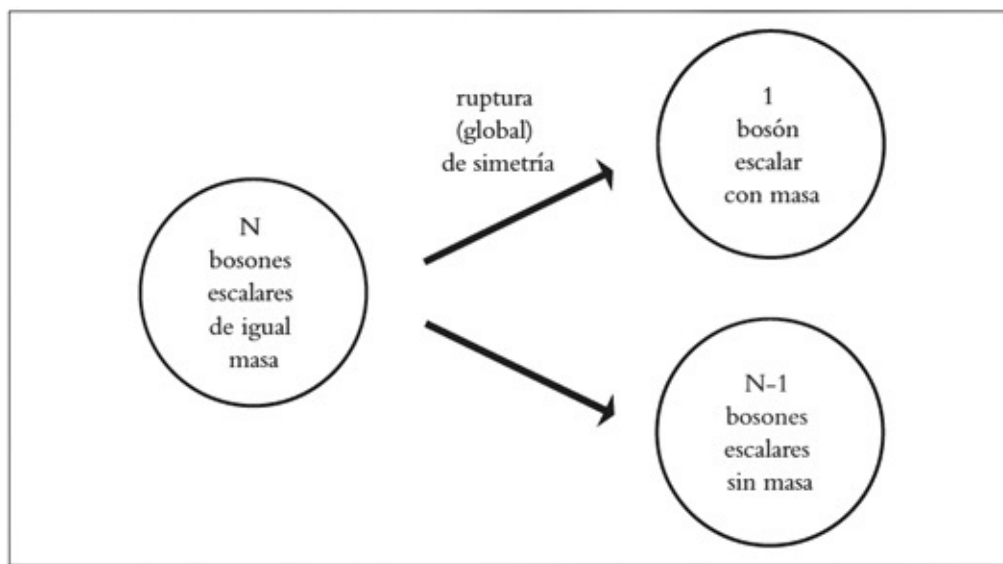
logros de Nambu consistió en demostrar (en parte con la colaboración del físico italiano Giovanni Jona-Lasinio) cómo podría producirse la ruptura espontánea de simetría incluso fuera de un superconductor. Podría ocurrir en el espacio vacío, en presencia de un campo de valor no nulo (un claro precursor del campo de Higgs). Cabe notar que su teoría también demostraba cómo un campo fermiónico que inicialmente careciese de masa podía adquirirla mediante el proceso de ruptura de simetría.

Por brillante que fuera, había que pagar un precio por la propuesta de ruptura espontánea de simetría de Nambu. Sus modelos, al tiempo que les proporcionaban masa a los fermiones, predecían una nueva partícula bosónica sin masa (precisamente lo que los físicos de partículas estaban tratando de evitar, puesto que no observaban que las fuerzas fundamentales produjesen tal partícula). No eran bosones de gauge, ya que Nambu estaba planteando la ruptura espontánea de simetrías globales, no locales. Se trataba de un nuevo tipo de partícula sin masa. Al poco tiempo, el físico escocés Jeffrey Goldstone alegó que esto no era simplemente un incordio: la ruptura espontánea de una simetría global siempre da lugar a partículas sin masa, conocidas ahora como «bosones de Nambu-Goldstone». El físico paquistaní Abdus Salam y el estadounidense Steven Weinberg colaboraron más tarde con Goldstone para elevar este argumento a lo que parecía ser una demostración concluyente, denominada actualmente «teorema de Goldstone».

Una de las cuestiones a las que debe dar respuesta cualquier teoría de ruptura de simetría es: ¿cuál es el campo que rompe la simetría? En un superconductor, esta es la función que desempeñan los pares de Cooper, estados compuestos de los electrones. En el modelo de Nambu-Jona-Lasinio, se produce un efecto similar gracias a los nucleones compuestos. Sin embargo, a partir del artículo de Goldstone de 1961, los físicos se fueron haciendo a la idea de postular la existencia de un conjunto de nuevos campos bosónicos fundamentales cuya función consistiría en romper simetrías al tomar un valor no nulo en el espacio vacío. Este tipo de campos se llaman «escalares», lo cual es una manera de decir

que no poseen espín intrínseco. Los campos de gauge que transmiten las fuerzas, aunque son también bosónicos, poseen espín 1, a excepción del gravitón, cuyo espín es 2.

Si la simetría no se rompiese, todos los campos del modelo de Goldstone se comportarían exactamente de la misma manera, como bosones escalares con masa, debido a los requisitos que impone la simetría. Una vez que esta se ha roto, se establecen diferencias entre los campos. En el caso de una simetría global (una única transformación en todo el espacio), que es la que Goldstone trató, uno de los campos sigue poseyendo masa, mientras que el resto pasan a convertirse en bosones de Nambu-Goldstone sin masa. He aquí a grandes rasgos el teorema de Goldstone.



Esto es lo que sucede cuando se rompe espontáneamente una simetría global. Sin la ruptura, habría un determinado número N de bosones escalares con la misma masa. Una vez rota la simetría, todos ellos menos uno se convierten en bosones de Nambu-Goldstone sin masa. El bosón restante sigue teniendo masa.

RECONCILIACIÓN

Estas eran malas noticias. Parecía como si, incluso si seguíamos las teorías BCS

y de Nambu y utilizábamos la ruptura espontánea de simetría como manera de proporcionar masa a los hipotéticos bosones de Yang-Mills que podrían transmitir las fuerzas nucleares, esa misma técnica daría lugar a otro tipo de bosón sin masa que no se observaba en los experimentos.

Por suerte, la solución a este rompecabezas se conoció casi al mismo tiempo que el propio problema en sí. Al menos la conocía Phil Anderson, de Bell Labs, que hizo lo que pudo por compartirla con el mundo. Anderson, que obtuvo el premio Nobel en 1977, es conocido como uno de los mayores expertos mundiales en física de la materia condensada. Ha sido un activo defensor de que la física de la materia condensada constituye en sí misma todo un campo científico. Su celebrado artículo de 1972 titulado «More Is Different» contribuyó a difundir la idea de que estudiar el comportamiento colectivo de muchas partículas era al menos igual de interesante y fundamental que el estudio de las leyes básicas que las propias partículas obedecen. En contraposición con el discreto Nambu, Anderson siempre ha sido proclive a decir lo que pensaba, a menudo de manera provocativa. El subtítulo de una colección de sus ensayos es «Notes from a Thoughtful Curmudgeon» y la biografía en la solapa interior nos informa de que «en el momento de la publicación estaba envuelto en varias controversias científicas sobre asuntos de relevancia, en los que su punto de vista, aunque impopular actualmente, probablemente acabe imponiéndose».

Si bien Nambu sin duda se inspiró en la teoría BCS, el modelo que propuso junto con Jona-Lasinio, de ruptura espontánea de simetría en el espacio vacío, trataba el caso de una simetría global, no local (o de gauge). Son las simetrías locales las que dan lugar a los campos de conexión, y por ende a las fuerzas de la naturaleza. Las simetrías globales nos ayudan a entender la presencia o ausencia de distintas interacciones, pero no dan pie a nuevas fuerzas.

Anderson no era físico de partículas, pero comprendía las ideas básicas tras los bosones de Nambu-Goldstone, que ocuparon un lugar destacado en su trabajo de 1958 sobre la teoría BCS. Ya en 1952 había discutido las consecuencias dinámicas de la ruptura de simetría (a día de hoy, considera que esta es su mayor

aportación a la física). Anderson sabía también que en realidad no podía ser cierto que la ruptura espontánea de simetría siempre estuviese asociada con partículas sin masa, porque esta se producía también en el modelo BCS, que no incluía partículas carentes de masa.

De manera que en 1962, motivado por el reconocimiento de su error por parte de Schwinger el año anterior, Anderson escribió un artículo (publicado en 1963) que trataba de explicar a los físicos de partículas cómo sortear la amenaza de las partículas sin masa. Era una solución elegante: las partículas sin masa transmisoras de fuerza de las que partimos, y los bosones de Nambu-Goldstone que resultan de la ruptura espontánea de simetría, se combinan para formar una única partícula transmisora de fuerza y con masa no nula. Es lo que, en otros contextos, se conoce como «dos errores cuentan como un acierto». Anderson habla explícitamente sobre el alcance de su análisis:

Es probable, por lo tanto, teniendo en cuenta la analogía de la superconductividad, que se haya despejado el camino hacia una teoría de vacío degenerado de tipo Nambu sin las complicaciones que suponen tanto los bosones de gauge de masa nula de Yang-Mills como los bosones de masa nula de Goldstone. Ambos tipos de bosones parecen capaces de «cancelarse mutuamente», dejando únicamente los bosones con masa finita.

Sin embargo, a pesar de este análisis, los físicos de partículas no recibieron el mensaje. O lo recibieron, pero no se lo creyeron. El argumento de Anderson hacía referencia a las propiedades generales de los campos en presencia de la ruptura espontánea de la simetría de gauge, pero no propuso un modelo explícito con un campo fundamental causante de la ruptura de simetría. Demostraba que se podían sortear las conclusiones del teorema de Goldstone, pero no explicaba con precisión dónde estaba el error en los presupuestos de los que el teorema partía.

Y lo que es más importante todavía, en los sistemas de materia condensada es fácil medir la velocidad con respecto al material circundante. En el espacio vacío, por el contrario, no existe un marco de referencia en reposo preferido: la

relatividad nos garantiza que todas las velocidades son creadas iguales.* En las demostraciones del teorema de Goldstone, la relatividad desempeñaba un papel fundamental. Para muchos físicos de partículas, el hecho de que Goldstone hubiese demostrado el teorema rigurosamente se imponía sobre los ejemplos de Anderson que lo contradecían, y apelaban a la relatividad para reconciliar las diferencias. En 1963, Walter Gilbert, físico en Harvard, escribió un artículo en el que exponía explícitamente este argumento. (Gilbert estaba en esa época abandonando la física para dedicarse a la biología. Pero no era la falta de talento la que motivaba el cambio de carrera: en 1980 compartió el premio Nobel de Química por su trabajo sobre los nucleótidos.) Un artículo de 1964 escrito por Abraham Klein y Benjamin Lee estudiaba cómo se podía sortear el teorema de Goldstone en un contexto no relativista, y sugería que se podría aplicar igualmente un razonamiento similar cuando se tuviese en cuenta la relatividad, pero sus argumentos no se consideraron definitivos.

El propio Anderson era reticente a tomarse demasiado en serio la idea de la ruptura espontánea de simetría en el espacio vacío, por un motivo de peso que aún nos incomoda a día de hoy. Si tenemos un campo con valor no nulo en el espacio vacío, esperamos que ese campo transporte energía. Puede tratarse de una cantidad positiva de energía, o bien negativa, pero no hay ninguna razón especial por la que deba ser cero. Einstein nos enseñó hace tiempo que la energía en el espacio vacío —la energía del vacío— tiene un efecto importante sobre la gravedad, acelerando o ralentizando la expansión del universo (según la energía sea positiva o negativa). Un cálculo rápido aproximado revela que la energía de la que estamos hablando aquí es tan enorme que la habríamos detectado hace mucho tiempo (o, para ser más precisos, no estaríamos aquí para detectarla, porque el universo habría estallado o se habría colapsado poco después del big bang). Este es «el problema de la constante cosmológica», que continúa siendo una de las cuestiones fundamentales aún por resolver en física teórica. A día de hoy, creemos que es muy probable que existe una minúscula energía positiva en el espacio vacío, la «energía oscura» que hace que el universo se acelere y por la

que se otorgó el premio Nobel de 2011. Pero la magnitud numérica de la energía oscura es mucho menor de lo que cabría esperar, por lo que el misterio sigue sin resolverse.

1964: ENGLERT Y BROUT

Todo físico, incluso cuando se encuentra en posesión de esa preciada mercancía que llamamos «una buena idea», vive constantemente con el temor de que alguien se le adelante, de que la idea se le ocurra a otra persona y la publique antes que él. Teniendo en cuenta la cantidad de ideas que es posible tener, podríamos pensar que esto no sucede con frecuencia. Pero las ideas no surgen de la nada: todos los científicos viven inmersos en un mosaico de charlas y artículos y conversaciones informales, y es muy habitual que dos o más personas que no se conocen entre sí estén pensando sobre los mismos problemas. (En el siglo XVII, Isaac Newton y Gottfried Leibniz inventaron el cálculo al mismo tiempo sin coordinación previa.)

En 1964, el año en que los Beatles desembarcaron en Estados Unidos como un ciclón, tres grupos independientes de físicos hicieron sendas propuestas muy similares que demostraban cómo la ruptura espontánea de una simetría local no produce ningún bosón sin masa, sino solo partículas con masa que dan lugar a interacciones de corto alcance. El primero en publicarse fue el artículo escrito por François Englert y Robert Brout, de la Universidad Libre de Bruselas (Bélgica). El siguiente en hacer acto de presencia fue Peter Higgs, de Edimburgo (Escocia), con dos artículos prácticamente simultáneos. A continuación, los estadounidenses Carl Richard Hagen y Gerald Guralnik (que había estudiado el doctorado bajo la tutela de Walter Gilbert) se asociaron con el inglés Tom Kibble para publicar otro artículo. Los tres grupos trabajaban independientemente, y cada uno merece recibir parte del reconocimiento por inventar lo que se conoce como el «mecanismo de Higgs», pero la discusión sobre en qué proporciones

precisas ha de repartirse dicho reconocimiento aún continúa abierta.

El artículo de Englert y Brout era breve y directo. Los dos físicos se habían conocido en 1959, cuando Englert pasó una temporada en Cornell como postdoc trabajando con Brout. El día que se conocieron, salieron a tomar una copa, que acabaron siendo varias, porque enseguida conectaron. Cuando Englert volvió a Bélgica en 1961 para ocupar un puesto de profesor, Brout y su mujer organizaron una estancia temporal en Bruselas, y poco después decidieron quedarse a vivir allí definitivamente. Siguieron siendo buenos amigos y colaboradores hasta el fallecimiento de Brout, en 2011.

En su discusión contemplan dos tipos de campos: el bosón de gauge transmisor de la fuerza y un conjunto de dos campos escalares, causantes de la ruptura de simetría, que toman un valor no nulo en el espacio. Es una configuración similar a la del trabajo de Goldstone sobre la ruptura de una simetría global, con la incorporación del campo de gauge que la simetría local exige. Pero no les prestan mucha atención a las propiedades de los campos escalares, sino que se concentran en lo que sucede con el campo de gauge. Demuestran, mediante diagramas de Feynman, que adquiere masa sin violar la simetría básica, lo cual está en perfecto acuerdo con los requisitos de la relatividad y choca con la preocupación de Gilbert. Todo esto lo hicieron, al parecer, sin tener conocimiento del artículo que Anderson había publicado el año anterior.

1964: HIGGS

Peter Higgs, después de doctorarse por el University College de Londres, se trasladó a Escocia para ocupar un puesto como lector en la Universidad de Edimburgo. Higgs tenía conocimiento del trabajo de Anderson y estaba interesado en demostrar explícitamente cómo se podía sortear el teorema de Goldstone en una teoría relativista. En junio de 1964 abrió el número más

reciente de *Physical Review Letters (PRL)*, la revista estadounidense de referencia sobre física, y se topó con el artículo de Gilbert. Un tiempo después, lo recordaba así: «Creo que mi reacción fue decir “mierda”, porque parecía que eso cerraba la puerta a las ideas de Nambu». Pero Higgs no se dio por vencido. Recordó que Schwinger había encontrado un fallo en el razonamiento habitual según el cual los bosones de gauge deben carecer de masa por motivos de simetría, y pensó que sería posible extender ese fallo también al caso de la ruptura espontánea de simetrías. Consciente de que era un asunto muy importante, Higgs escribió rápidamente un artículo breve que se publicó en *Physics Letters*, la homóloga europea de *Physical Review Letters*. En él, por primera vez, se demostraba explícitamente cómo se podían eludir los presupuestos del teorema de Goldstone en el caso de una simetría de gauge, incluso cuando la relatividad se respeta escrupulosamente.

Lo que Higgs no proponía en su primer artículo era un modelo específico para la erradicación de los bosones sin masa. Y eso fue exactamente lo que aportó el segundo artículo, en el que examinaba el comportamiento de un par de campos escalares como los de Goldstone, responsables de la ruptura de simetría, acoplados a un campo de gauge transmisor de la fuerza, y demostraba que el campo de gauge engullía el bosón de Nambu-Goldstone para dar lugar a un único bosón de gauge con masa. Envío este segundo artículo también a *Physics Letters*, que lo rechazó de inmediato. Esto pilló por sorpresa a Higgs, que no podía entender cómo una revista publicaba un artículo afirmando que: «Los bosones con masa son posibles», pero no otro que dijese: «He aquí un modelo real que incluye bosones de gauge con masa». Pero, una vez más, se negó a darse por vencido. Añadió un par de párrafos en los que desarrollaba las consecuencias físicas del modelo y lo remitió a *Physical Review Letters*, en Estados Unidos, donde fue aceptado. El árbitro que lo revisó —que, según Higgs pudo saber más tarde, era Nambu— recomendó que se incluyese una referencia al artículo de Englert y Brout, recién publicado.

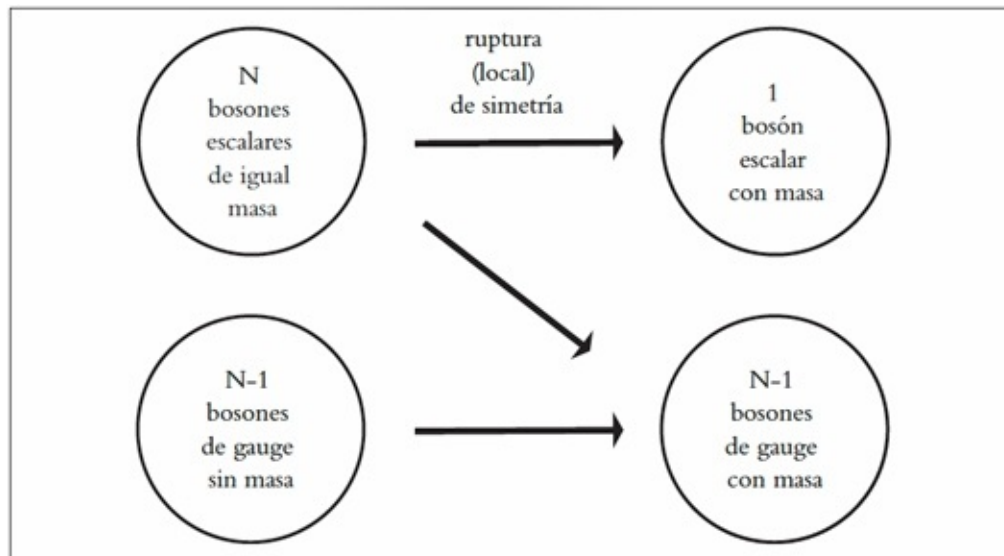
Entre las cosas que Higgs añadió tras el rechazo de su segundo artículo estaba

un comentario en el que señalaba que su modelo no solo hacía que los bosones de gauge tuvieran masa, sino que también predecía la existencia de un bosón escalar con masa (la primera aparición explícita de nuestro querido «bosón de Higgs»). Recuerda que el modelo de Goldstone de ruptura de una simetría global predecía varios bosones de Nambu-Goldstone sin masa, pero también una partícula escalar con masa. En el caso de una simetría local, los aspirantes a bosones escalares sin masa eran engullidos por los campos de gauge, que adquirirían masa. Pero el campo escalar con masa de la teoría de Goldstone sigue existiendo en la de Higgs. Englert y Brout no hablaron de esta otra partícula aunque, retrospectivamente, está implícita en sus ecuaciones (como lo estaba en el trabajo de Anderson).

Mirando un poco hacia el futuro, en la implementación en el mundo real del mecanismo de Higgs en el Modelo Estándar, antes de la ruptura de simetría partimos con cuatro bosones escalares y tres bosones de gauge sin masa. Cuando la simetría se rompe porque los escalares toman un valor no nulo en el espacio vacío, tres de los bosones escalares son engullidos por los bosones de gauge. Nos quedamos, pues, con tres bosones de gauge con masa (los W y el Z) y un escalar con masa (el Higgs). Otro bosón de gauge carece de masa tanto al principio como al final: el fotón. (De hecho, el fotón es una combinación de varios de los bosones de gauge iniciales, pero las cosas ya son bastante complicadas como para que entremos en más detalles.) En cierto sentido, en los años ochenta descubrimos tres cuartas partes de los bosones de Higgs, cuando encontramos los W y el Z.

Aunque se podría discutir si fue Anderson, Englert y Brout, o Higgs quien propuso por primera vez el mecanismo de Higgs por el cual los bosones de gauge adquieren masa, el propio Higgs tiene argumentos para defender que a él se debe la primera aparición del bosón de Higgs, la partícula que ahora utilizamos como evidencia de que así es como funciona la naturaleza. (Otros podrían señalar —y de hecho, lo hacen— que los artículos anteriores podrían haber mencionado el bosón de Higgs, pero no lo hicieron, porque su existencia

debería resultar obvia una vez que el resto del trabajo estaba hecho.) En 1966, en un artículo posterior, Higgs estudió con más detenimiento las propiedades de este bosón. Pero si la versión inicial de su artículo no hubiese sido rechazada por *Physics Letters* puede que nunca le hubiese prestado atención al bosón.



Esto es lo que sucede cuando se rompe espontáneamente una simetría local, que se puede comparar con el caso de la simetría global que hemos visto antes. Ahora, la situación simétrica contempla tanto bosones de gauge sin masa como escalares con masa. Los bosones que carecerían de masa tras la ruptura de simetría son engullidos por los bosones de gauge, que adquieren masa. Hay un único bosón escalar con masa restante: el bosón de Higgs.

Higgs tenía perfecto conocimiento del artículo de Anderson de 1963. Suele atribuirle a Anderson buena parte del mérito, pero argumenta que este no fue lo suficientemente lejos: «Anderson debería haber hecho, básicamente, las dos cosas que hice yo. Debería haber demostrado el fallo en el teorema de Goldstone y debería haber desarrollado un sencillo modelo relativista para mostrar lo que sucedía. No obstante, siempre que doy una charla sobre el denominado mecanismo de Higgs empiezo con Anderson, que acertó en su planteamiento, aunque nadie lo comprendiese a él».

1964: GURALNIK, HAGEN Y KIBBLE

Guralnik, Hagen y Kibble completaron su artículo después —aunque muy poco— de que los de Englert y Brout y Higgs se hubiesen publicado. El artículo de GHK surgió de las prolongadas conversaciones entre Guralnik y Hagen, que habían estudiado juntos la carrera en el MIT y que escribieron su primer artículo juntos después de que Hagen continuase con sus estudios de doctorado en el MIT y Guralnik se trasladase río arriba a Harvard. Esas conversaciones dieron sus frutos una vez que Guralnik realizó una estancia posdoctoral en el Imperial College de Londres, donde Abdus Salam daba clase y la ruptura espontánea de simetría era un tema en boga. Kibble también era profesor allí, y habló a menudo con Guralnik sobre la manera de eludir el teorema de Goldstone. Una visita de Hagen fue el detonante para que el trío plasmase sus resultados en un artículo.

Según han contado años después, en octubre de 1964, Hagen y Guralnik «estaban literalmente metiendo el manuscrito en el sobre para enviarlo a *PRL*, [cuando] Kibble entró en el despacho con los dos artículos de Higgs y el de Englert y Brout». Este último había sido remitido el 26 de junio de 1964 y se publicó en agosto; los dos artículos de Higgs se remitieron el 27 de julio y el 31 de agosto, y aparecieron en septiembre y octubre, respectivamente; el artículo de GHK se presentó el 12 de octubre, y se publicó en noviembre. Su reacción inmediata fue la de reconocer que estos trabajos, que hasta ese momento desconocían, eran relevantes, pero no sintieron que se les hubiesen adelantado. GHK pensaban que Englert-Brout y Higgs habían resuelto con éxito la cuestión de cómo podían adquirir masa los bosones de gauge a través de la ruptura espontánea de simetría, pero no se habían enfrentado directamente al asunto de dónde estaba exactamente el error en el teorema de Goldstone, algo que preocupaba mucho al trío anglo-estadounidense. Creían que la discusión por parte de Englert-Brout de lo que sucedía con los distintos campos en vibración

era algo oscura, y que los artículos de Higgs eran completamente clásicos, que no estaban formulados en el lenguaje de la mecánica cuántica.

Habida cuenta de ello, GHK sacaron el artículo del sobre e incluyeron una referencia a esos trabajos tan recientes: «Estudiaremos como ejemplo una teoría que ha sido parcialmente resuelta por Englert y Brout, y que guarda un cierto parecido con la teoría clásica de Higgs». Puesto que la invención casi simultánea de ideas es algo bastante habitual, se ha establecido una convención en la literatura física: si aparece otro artículo antes de que el tuyo esté finalizado, incluyes una nota al final con una referencia al mismo, acompañada de la siguiente explicación: «Mientras este trabajo se estaba completando, recibimos un artículo relacionado escrito por...». GHK olvidaron hacerlo explícitamente, pero nadie duda de que su artículo estaba en buena medida acabado cuando tuvieron noticias del resto de los artículos. Es lo suficientemente distinto, y se envió tan poco tiempo después de que apareciesen los otros, que no cabe la posibilidad de que simplemente se basasen en los artículos de Englert-Brout y Higgs.

Guralnik, Hagen y Kibble le dan al problema de la ruptura espontánea de una simetría de gauge un tratamiento plenamente cuántico. Se centran con especial atención en la cuestión de cómo eludir los presupuestos de partida del teorema de Goldstone. No obstante, no explican el bosón de Higgs demasiado bien. Aunque se espera que el verdadero Higgs tenga masa, GHK deciden hacer que su masa sea nula. Su único comentario explícito acerca de esta partícula es simplemente: «Aunque, al inspeccionarla, observamos que la teoría contempla una partícula sin masa, es fácil ver que esta está completamente desacoplada de las demás excitaciones (con masa) y que no tiene nada que ver con el teorema de Goldstone». Esas afirmaciones son ciertas dentro el modelo que están estudiando, pero únicamente porque establecen a mano que tanto los acoplamientos como la masa son nulos. En el mundo real, esperamos que el Higgs posea masa y se acople con otras partículas.

Hubo otro equipo más que siguió esa misma dirección, si bien con algo de

retraso (unos pocos meses). En aquella época existían numerosos obstáculos burocráticos que dificultaban la comunicación entre la Unión Soviética y Occidente. Por eso, en 1965, cuando los físicos Alexander Migdal y Alexander Polyakov —ambos de diecinueve años por aquel entonces— reflexionaban sobre la ruptura espontánea de simetría en teorías de gauge, no estaban al corriente de ninguno de los artículos publicados en 1964. Su trabajo independiente tuvo que superar el estricto filtro de unos árbitros incrédulos, y no apareció hasta 1966.

A pesar de toda esta actividad simultánea, muchos físicos seguían mostrándose reticentes a aceptar que las simetrías locales ofreciesen una vía para escapar de las partículas sin masa. Higgs cuenta la historia de cuando impartió un seminario en Harvard, donde el teórico Sidney Coleman había incitado a sus alumnos a «hacer pedazos a este bufón que se cree más listo que el teorema de Goldstone». (Puedo dar fe de la veracidad de la historia, porque el propio Coleman la refirió cuando fui alumno suyo en la clase de teoría cuántica de campos muchos años después.) Pero Englert, Brout, Higgs, Guralnik, Hagen y Kibble tenían algo importante a su favor: la razón. Muy poco después, se haría buen uso de sus ideas en uno de los mayores logros de lo que ahora conocemos como el Modelo Estándar.

LAS INTERACCIONES DÉBILES

Toda esta discusión sobre distintos tipos de ruptura espontánea de simetría se había centrado en cuestiones fundamentales de la teoría cuántica de campos: ¿qué puede suceder, y en qué circunstancias? Estaba aún por ver si los fenómenos descritos eran de hecho relevantes en el mundo real. Sin embargo, no pasó mucho tiempo hasta que encontraron acomodo definitivo en nuestra comprensión de las interacciones débiles.

La primera teoría prometedora de las interacciones débiles la inventó Enrico Fermi en 1934. Fermi aplicó la reciente idea del neutrino, que Wolfgang Pauli

había propuesto poco tiempo antes, para desarrollar un modelo de la desintegración de los neutrones, que actualmente diríamos que está mediada por las interacciones débiles. El cálculo de Fermi supuso también uno de los primeros éxitos de la teoría cuántica de campos, como hemos visto en el capítulo 7.

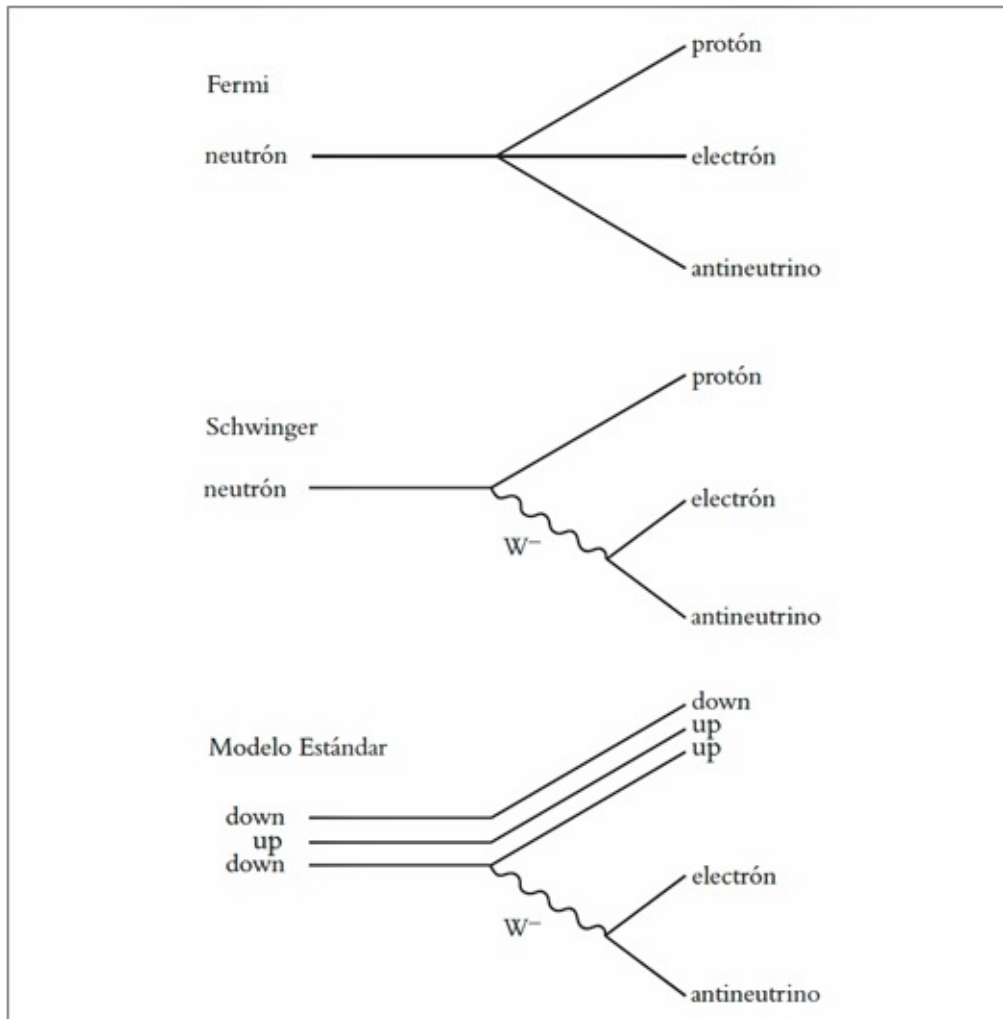
La teoría de Fermi encajaba bien con los datos, pero solo si no se forzaba demasiado. En muchos de los cálculos en teoría cuántica de campos, primero se busca una solución aproximada, que después se va mejorando poco a poco, básicamente al incluir las contribuciones de los diagramas de Feynman más complejos. En la teoría de Fermi, el resultado de la primera aproximación es muy bueno, pero la siguiente aportación (que debería ser una pequeña corrección) resulta ser infinitamente grande. Este es un problema grave, que se ceñiría sobre la física de partículas a lo largo de todo el siglo xx. Desde luego, las soluciones infinitas no son correctas, por lo que son señal de que la teoría no es muy buena. Una teoría tiene que ajustarse a los datos, pero también debe tener sentido desde un punto de vista matemático.

El problema de las soluciones infinitas no se limitaba a las interacciones débiles, también llegaba hasta el electromagnetismo, que debería ser una de las teorías cuánticas de campos más sencillas y fáciles de entender. Sin embargo, resultó que en ese dominio los infinitos se pudieron controlar. El proceso para hacerlo, conocido como «renormalización», es el que les supuso el premio Nobel a Feynman, Schwinger y Tomonaga.

Algunas teorías de campos son renormalizables —existen técnicas matemáticas bien definidas para obtener soluciones finitas— y otras no lo son. En la teoría cuántica de campos moderna, cuando una teoría no es renormalizable no se descarta directamente. Simplemente, nos limitamos a reconocer que se trata, como máximo, de una aproximación, válida solo quizá para energías muy bajas, y que a energías más elevadas debe existir física nueva que permita controlar los infinitos. Sin embargo, durante mucho tiempo, el

hecho de que una teoría no fuese renormalizable se tomaba como una señal de que no había manera de repararla. La teoría de Fermi de las interacciones débiles resultó ser no renormalizable: cuando se la exprime demasiado da soluciones infinitas, y no hay manera de arreglarla que no pase por sustituirla por una teoría mejor.

Julian Schwinger, que había mostrado interés por la idea de Yang-Mills según la cual simetrías más elaboradas podrían producir campos de conexión que permitiesen explicar las fuerzas de la naturaleza, enseguida aplicó la idea a las interacciones débiles. Pero, obviamente, surgía un problema inmediato: se supone que los bosones de Yang-Mills carecen de masa, lo que implica que la fuerza es de largo alcance, pero la interacción débil es claramente de corto alcance. Schwinger se limitó a dejar de lado este problema: partió de un modelo de Yang-Mills e impuso a mano que dos de los bosones que transmiten las fuerzas tuviesen masa. Esta fue la primera aparición de lo que ahora conocemos como bosones W^+ y W^- . (Al menos, una de las primeras. Según Leon Lederman: «Las versiones más modernas de la teoría de Fermi, en particular la de Schwinger, introdujeron los W^+ y W^- pesados como transmisores de la fuerza débil. Lo mismo hicieron varios otros teóricos, como Lee, Yang, Gell-Mann... Me da miedo mencionar a algún teórico, porque eso hará que el 99 por ciento restante se enfaden».)



Diferentes visiones de las interacciones débiles, tomando como ejemplo la desintegración del neutrón. En la teoría de Fermi, un neutrón se desintegra directamente en un protón, un electrón y un antineutrino. Schwinger propuso que el neutrón emitiría un bosón W^- , que después se desintegraría en un electrón y un antineutrino. Estaba en lo cierto, pero ahora sabemos que el neutrón está formado por tres quarks, uno de los cuales pasa de up a down al emitir un W^- .

El motivo por el que los bosones de Yang-Mills tenían masa nula es la simetría que está en la base de la teoría. Al conferirles masa, Schwinger dejó entrever que la simetría estaba rota, pero en este caso se trataba de una ruptura explícita, no espontánea (en la que la simetría estaría oculta por un campo cuyo valor en el espacio vacío sería distinto de cero, que no se había inventado aún).

No era un campo el que la rompía, sino el propio Schwinger quien lo decidía. Como habrá supuesto el lector, esta construcción ad hoc causó estragos en el modelo. Por una parte, la posibilidad de renormalizar el electromagnetismo depende crucialmente de la simetría básica de la teoría y, al hacer caso omiso de dicha simetría, Schwinger propiciaba que su modelo no fuese renormalizable. Más adelante se llegaría a la conclusión de que una teoría de bosones de gauge con masa solo es renormalizable si y solo si las masas proceden de la ruptura espontánea de la simetría. Pero aún habrían de pasar varios años.

No obstante, Schwinger no se empecinó en una teoría arriesgada por pura cabezonería. Una de las características de los genios es que reconocen cuáles son las ideas que merece la pena explorar, aunque parezca que aún no funcionan. Una propiedad interesante del modelo de Schwinger es que, de hecho, predecía la existencia de tres bosones de gauge: los dos bosones W con carga, a los que él les asignaba masa, y un único bosón de gauge neutral, que podía seguir teniendo masa nula. Todos conocemos un bosón de gauge neutro y sin masa: el fotón, por supuesto. Schwinger se sintió espoleado por la idea de que este enfoque ofrecía la promesa de unificar el electromagnetismo con las interacciones débiles, lo que supondría un gran paso adelante para la física. Probablemente, eso fue lo que lo llevó a perseverar pese a los problemas que presentaba su modelo.

Pero no perseveró durante mucho tiempo. El artículo de Schwinger se publicó en 1957, y ese mismo año se descubrió que las interacciones débiles violan la paridad. Recuerde del capítulo 8 (y el apéndice 1) que las partículas son o bien levógiras o dextrógiras, dependiendo de cómo roten. La violación de la paridad significa que las interacciones débiles se acoplan con las partículas levógiras, pero no con las dextrógiras. Es posible inventar simetrías de Yang-Mills en las que solo intervengan las partículas levógiras, pero sabemos que el electromagnetismo no viola la paridad (dispensa el mismo trato a izquierda y derecha). Parecía que este descubrimiento acababa con todas las esperanzas de Schwinger de unificar las fuerzas débil y electromagnética.

LA UNIFICACIÓN ELECTRODÉBIL

A veces, como profesor, lo correcto no es darse por vencido, sino pasarle todas tus cuestiones a un estudiante de doctorado. Afortunadamente, Schwinger tenía un alumno muy joven y brillante a su disposición: Sheldon Glashow, a quien le asignó la tarea de pensar sobre la unificación del electromagnetismo y las interacciones débiles. La personalidad de Glashow es expansiva y carismática y, como físico, le encanta saltar rápidamente de una idea a otra. Esta inclinación le fue muy útil en la búsqueda de la unificación, pues siempre estaba dispuesto a proponer una teoría y pasar enseguida a la siguiente. Tras varios años reflexionando sobre el asunto de manera intermitente, llegó a un esquema prometedor para lo que acabaría denominándose «unificación electrodébil».

El punto delicado era la paridad: el electromagnetismo la preserva, mientras que las interacciones débiles la violan. ¿Cómo podrían unificarse? La idea de Glashow consistió en introducir dos simetrías distintas: una que trata por igual a las partículas levógiras y dextrógiras, y otra que las trata de manera diferente. El lector podría pensar que esto no es ningún avance: tener dos simetrías distintas no parece que sea una gran unificación. El secreto del modelo de Glashow es que ambas simetrías se rompían, pero de tal manera que una determinada combinación de ambas permanecía intacta.

Imaginemos dos ruedas dentadas. Cada una de ellas puede rotar de manera independiente, como las dos simetrías iniciales de Glashow. Pero, si las juntamos, los dientes de ambas ruedas se engranan entre sí, y ahora solo pueden moverse al compás. Tienen menos libertad que antes. En el modelo de Glashow, la simetría que permanece intacta es como la capacidad de mover ambas ruedas juntas, mientras que la simetría rota es similar a la imposibilidad de moverlas a distintas velocidades. El bosón de gauge sin carga ni masa que corresponde a la simetría intacta de Glashow es por supuesto el fotón.

Esta idea parecía capaz de acomodar las características conocidas tanto de las

interacciones débiles como de la electromagnética. (Seguía adoleciendo del problema de que las masas de los bosones de gauge se añadían a mano, y la teoría no era renormalizable.) Pero se desviaba de lo conocido al predecir un nuevo bosón de gauge: sin carga eléctrica pero con masa, lo que ahora conocemos como Z. Por aquel entonces, no había evidencia de que tal partícula existiese, por lo que el modelo no suscitó demasiado interés.

Aunque la selección de los ingredientes que Glashow combinó en su intento de unificar el electromagnetismo con las interacciones débiles puede parecer algo arbitraria, claramente hay en ella algo de razonable: Al otro lado del océano, en Gran Bretaña, en el Imperial College de Londres, Abdus Salam y John Ward estaban construyendo una teoría casi idéntica. Individualmente, cada uno de estos dos físicos atesoraba importantes méritos. Ward, nacido en Gran Bretaña pero que había pasado varios años viviendo en Australia y Estados Unidos, era un pionero de la electrodinámica cuántica. Probablemente sea conocido sobre todo por las «identidades de Ward» en teoría cuántica de campos, relaciones matemáticas que hacen que se respeten las simetrías locales. Salam, que había nacido en Pakistán cuando, junto con la India, aún estaba bajo control británico, acabaría entrando en política y se convertiría en un promotor de la ciencia en los países en vías de desarrollo. Colaboraban con frecuencia, y juntos habían realizado algunos de sus mejores trabajos sobre la cuestión de la unificación de fuerzas.

Siguiendo una lógica muy similar a la de Glashow, Salam y Ward inventaron un modelo con dos simetrías distintas, una de las cuales violaba la paridad y la otra no, y que predecía un fotón sin masa y tres bosones de gauge débiles con masa. Su artículo se publicó en 1964, aparentemente sin que sus autores tuviesen conocimiento del trabajo previo de Glashow. Como él, en su modelo rompían simetrías a discreción, pero, a diferencia de Glashow, no tenían excusa para hacerlo: sus despachos se encontraban literalmente en el mismo pasillo que los de Guralnik, Hagen y Kibble, que estaban plenamente concentrados en la ruptura espontánea de simetría.

El fallo de comunicación pudo deberse, en parte, a la naturaleza reservada de Ward. En su libro *The Infinity Puzzle*, Frank Close relata una historia reveladora que le contó Gerald Guralnik:

Guralnik y Ward estaban comiendo juntos en un pub, y Guralnik empezó a hablar de su trabajo —aún incompleto— sobre simetrías ocultas. «No conseguí hablar mucho antes de que [Ward] me callase y procediese a explicarme que no debería comentar libremente ideas que aún no hubiese publicado, porque me las podrían robar y publicarlas antes de que hubiese podido finalizar mi trabajo con ellas.» Como consecuencia de esta admonición, Guralnik no le preguntó a Ward sobre el trabajo que este estaba llevando a cabo con Salam.

Incluso aunque adopte una postura tan precavida en cuanto a comentar trabajos sin publicar, ni siquiera el más reservado de los físicos se muestra reacio a hablar de los que ya se han publicado. Sin embargo, por el motivo que fuera, Salam y Ward no se enteraron de lo que Guralnik, Hagen y Kibble proponían hasta varios años más tarde. Salam acabaría sabiendo de estos trabajos a través de sus conversaciones con Tom Kibble, y durante años se refirió a él como el «mecanismo de Higgs-Kibble».

ENCAJANDO TODAS LAS PIEZAS

Las últimas piezas del rompecabezas se pusieron en su sitio en 1967. Steven Weinberg había coincidido con Sheldon Glashow en el Bronx High School of Science, pero nunca colaboraron directamente en el trabajo teórico por el que ambos compartirían el premio Nobel con Salam en 1977. Hoy en día, Weinberg es un veterano y respetado anciano de la tribu de la física, autor de varios libros influyentes, así como de numerosos artículos en *The New York Review of Books*, entre otros. También fue un defensor destacado del Supercolisionador Superconductor (y lo habría sido incluso aunque no se hubiese construido en Texas, adonde se trasladó en 1982).

En 1967, Weinberg era un joven profesor en el MIT que llegaba cada día al campus al volante de un Camaro rojo. Estaba profundamente interesado por la ruptura espontánea de simetría, pero la utilizaba para tratar de entender las interacciones fuertes. Inspirado por un artículo reciente de Kibble, Weinberg estaba jugando con un conjunto de simetrías que, sin que él lo supiese entonces, guardaban un estrecho parecido con las que estaban estudiando Glashow, Salam y Ward. El problema era que seguía prediciendo un bosón de gauge sin masa ni carga, lo cual parecía que no existía en las interacciones fuertes.

En septiembre de ese año, Weinberg de pronto cayó en la cuenta de que había estado tratando de resolver el problema equivocado. Su modelo, que tantas complicaciones presentaba para las interacciones fuertes, funcionaba muy bien como teoría de las interacciones débiles y electromagnéticas. El molesto bosón sin masa no era un defecto, sino una virtud: se trataba del fotón. En un breve artículo titulado «A Theory of Leptons», Weinberg agrupó lo que, hoy en día, cualquier estudiante de doctorado en física de partículas reconocería inmediatamente como lo que se conoce como el sector «electrodébil» del Modelo Estándar. Entre sus referencias citó el artículo de Glashow, pero aún no estaba al tanto del publicado por Salam y Ward. Utilizando las ideas de Kibble, fue capaz de hacer una predicción directa de las masas de los bosones W y Z, cosa que ni Glashow ni Salam y Ward habían podido hacer, puesto que habían añadido a mano los valores de las masas. Weinberg explicó el mecanismo por el que todos los fermiones en la teoría, así como los bosones de gauge, adquirirían masa. Incluso señaló que el modelo podría ser renormalizable, aunque no supo ofrecer entonces ningún argumento convincente. Por fin se había construido una teoría coherente de la unificación electrodébil.

Prácticamente al mismo tiempo, Kibble y Salam por fin cayeron en la cuenta de que compartían interés por la ruptura de simetría, y Kibble le explicó la teoría a Salam. Este comprendió que podría adaptar el modelo que había propuesto con Ward para incluir los bosones escalares responsables de la ruptura de simetría, y compartió sus ideas en varias charlas ante un público reducido en el Imperial

College. Por motivos que se desconocen, Salam no plasmó sus ideas por escrito de inmediato. Como físico, era extremadamente prolífico, pero su interés principal en esos días era la gravedad, no las fuerzas subatómicas. En consecuencia, su propuesta para añadir un mecanismo de Higgs al modelo de Salam-Ward no se publicó hasta un año más tarde, cuando la incluyó en las actas de la ponencia que presentó en un congreso (y donde también cita el artículo de Weinberg).

Los artículos por separado de Weinberg y Salam tuvieron el impacto —como dijo Kurt Vonnegut en un contexto diferente— de una tortita de cuatro metros de diámetro lanzada desde una altura de cinco centímetros. En el mundo académico, y en la ciencia en particular, la manera más concreta de cuantificar la influencia de una investigación es contar cuántas veces se cita el artículo en otros artículos. Entre 1967 y 1971, el de Weinberg apenas se citó un puñado de veces. Ambos autores ni siquiera desarrollaron sus ideas mucho más en los años siguientes. Sin embargo, desde 1971 el artículo de Weinberg ha sido citado más de 7.500 veces, un promedio de una vez cada dos días durante cuatro décadas.

¿Qué ocurrió en 1971? ¿Hubo algún resultado experimental sorprendente? No. Lo que hubo fue un resultado teórico sorprendente: Gerard 't Hooft, un joven estudiante de doctorado en los Países Bajos, que trabajaba bajo la dirección de Martinus «Tini» Veltman, demostró que las teorías con ruptura espontánea de simetrías son renormalizables, incluso aunque los bosones de gauge tengan masa. Dicho de otro modo, 't Hooft demostró que la teoría electrodébil tenía sentido matemáticamente. Esto era algo que tanto Weinberg como Salam habían conjeturado, pero muchos de sus colegas seguían sin verlo claro, lo que explica en parte la poca atención que sus ideas habían recibido hasta ese momento. En palabras de Sidney Coleman, 't Hooft «reveló que la rana de Weinberg y Salam era un príncipe encantado». Desde entonces, Gerard 't Hooft se ha ganado la reputación de ser una de las mentes más creativas y brillantes de la física. Veltman y él compartieron el premio Nobel de 1999 por su trabajo sobre la teoría electrodébil y la ruptura espontánea de simetría.

No obstante, los resultados experimentales sorprendentes no tardaron en llegar. La principal predicción novedosa de los modelos de Glashow, Salam-Ward y Weinberg era la existencia de un bosón neutro y pesado, el Z. Los efectos de los bosones W eran bien conocidos: su emisión hace que varíe la identidad de un fermión (por ejemplo, al transformar un quark down en uno up durante la desintegración de un neutrón). Si el Z existiese, eso supondría que existiría a su vez una versión de las interacciones débiles en la que las partículas conservarían sus identidades; por ejemplo, un núcleo atómico podría dispersar a un neutrino. Fueron precisamente eventos de este tipo los que se observaron en el detector Gargamelle del CERN en 1973, lo que propició que Glashow, Salam y Weinberg compartiesen el premio Nobel en 1979. (Ward se quedó fuera, pues solo tres personas como máximo pueden compartir el premio cada año.) A diferencia de sus efectos indirectos, los bosones W y Z en sí no se descubrieron hasta que Carlo Rubbia los encontró unos pocos años después.

Lo único que quedaba por descubrir era el bosón de Higgs.

DANDO NOMBRES

Los físicos son seres humanos. Normalmente los motiva lo que Richard Feynman llamaba «el placer de descubrir», pero cuando encuentran algo interesante agradecen que se les reconozca su trabajo. A lo largo de este libro, siguiendo la costumbre prácticamente universal en la comunidad física, me he venido refiriendo al «mecanismo de Higgs» como aquel por el que los bosones de gauge adquieren masa a través de la ruptura espontánea de simetría, y al «bosón de Higgs» como la partícula escalar que este modelo predice. Queda claro no obstante que, aunque las aportaciones de Higgs fueron importantes, no estuvo ni mucho menos solo. ¿Por qué es ese el nombre, y cuál debería haber sido?

Nadie está del todo seguro de dónde procede originalmente el término «bosón

de Higgs». Desde luego, no del propio Higgs. La tradición señala a Benjamin Lee, el brillante físico coreano-estadounidense que murió en un trágico accidente de coche en 1977. Lee tuvo conocimiento de la ruptura espontánea de simetría a través de sus conversaciones con Higgs, y la historia dice que dio una charla seminal en una conferencia en el Fermilab en 1972, durante la cual se refirió en repetidas ocasiones al «mesón de Higgs». Era el momento inmediatamente posterior al revolucionario resultado de 't Hooft, cuando todo el mundo se las veía y se las deseaba para entender estas nuevas ideas. Precisamente porque los físicos son seres humanos, la pereza los lleva a seguir utilizando las primeras palabras que oyeron para referirse a un asunto, de manera que una charla que tuviese mucha repercusión puede hacer mucho por difundir una determinada nomenclatura.

Otra teoría se remonta al artículo de Weinberg de 1967. Cuando se publicaron los artículos originales en 1964, no había muchos físicos que estuviesen pensando sobre rupturas espontáneas de simetría en teorías de gauge. Tras el gran avance que supuso el resultado de 't Hooft en 1971, fueron muchos los que trataron de ponerse al día, y el artículo de Weinberg constituía un buen punto de partida. En su discusión del mecanismo de Higgs, Weinberg hace referencia a tres artículos escritos por Higgs, así como al de Englert y Brout y a otro de Hagen, Guralnik y Kibble. Sin embargo, Higgs aparece el primero en su lista de referencias, debido a una confusión entre *Physical Review Letters* (donde apareció el segundo artículo de Higgs) y *Physics Letters* (donde se publicó el de Englert y Brout). De pequeños lapsus como este vienen duraderas consecuencias.

Quizá lo más importante sea que «bosón de Higgs» suena bien como nombre de una partícula. Los artículos de Higgs fueron los primeros en llamar la atención sobre la partícula bosónica, en lugar de centrarse en el «mecanismo» a través del que surge, pero eso no parece suficiente para explicar la convención en torno al nombre. Cabría preguntarse, entonces, cuál podría ser la alternativa. En los primeros tiempos habría sido posible idear un término que no derivase del

nombre de una persona. El «bosón radial», quizá, o el «vestigión», pues el bosón es el único vestigio del proceso de ruptura de la simetría. «Bosón electrodébil» podría valer, aunque se correría el riesgo de confundirlo con los bosones W y Z, por lo que «bosón electrodébil escalar» sería más preciso.

Pero, a falta de una expresión como las anteriores (que tampoco es que sean demasiado buenas), es difícil hacer justicia a la historia al elegir un nombre. El propio Higgs se refiere al «bosón al que le han puesto mi nombre», y a veces habla del «mecanismo ABEGHHK'tH» (por Anderson, Brout, Englert, Guralnik, Hagen, Higgs, Kibble y 't Hooft, por si alguien lleva la cuenta). Joe Lykken, del Fermilab, prefiere a Nambu en lugar de 't Hooft y utiliza así «HEHKBANG», un acrónimo que al menos se puede pronunciar, aunque no sea mucho más atractivo. «Sería una bobada», concede el propio Lykken.

En última instancia, hay que reconocer que el nombre de la partícula no es más que una etiqueta. No es una historia exhaustiva y justa del desarrollo de una idea, ni debería entenderse como tal. Podemos llamarlo «bosón de Higgs» sin dar por supuesto que Higgs es el único que merece reconocimiento. (Habida cuenta de las dificultades de financiación de la física de partículas actual, sospecho que mucha gente estaría más que dispuesta a vender los derechos del nombre por 10.000 millones de dólares. ¿«El bosón McDonald's», por ejemplo?)

EL VEREDICTO DE LA HISTORIA

En la historia tal y como la hemos contado, Nambu y Goldstone contribuyeron a asentar nuestra comprensión de la ruptura espontánea de simetría, pero ambos se centraron en el caso de las simetrías globales. Anderson señaló que las simetrías de gauge son diferentes, y en particular que no dejan ningún vestigio en forma de partículas sin masa, pero no construyó un modelo explícitamente relativista. Esto lo hicieron de manera independiente Englert y Brout; Higgs y Guralnik, y Hagen y Kibble. Los tres grupos siguieron sendas ligeramente distintas, pero

obtuvieron básicamente las mismas soluciones, y los tres merecen buena parte del reconocimiento. Como también lo merece 't Hooft, que demostró que la idea tenía sentido desde un punto de vista matemático.

La tradición dice que los premios Nobel en ciencia se otorgan a individuos concretos, no a grupos, y a un máximo de tres personas cada año. No cabe duda de que los candidatos están tomando posiciones, al menos discretamente. 't Hooft y Veltman ya ganaron el Nobel por su trabajo sobre la renormalización de la teoría electrodébil. Anderson lo obtuvo por algo completamente distinto, pero, siendo realistas, eso influye negativamente sobre la posibilidad de que lo obtenga de nuevo (aunque el hecho de haber sido el primero pese a su favor). Robert Brout falleció en 2011, y los premios Nobel no se conceden a título póstumo.

En 2004 se les concedió el premio Wolf de Física —que a veces se califica como el segundo más prestigioso, después del Nobel— a Englert, Brout y Higgs, pero no a Guralnik, Hagen y Kibble. En un encuentro «Higgs Hunting» celebrado en Francia en 2010, el póster que lo anunciaba hace mención directa a «Brout, Englert y Higgs», dejando fuera por completo a GHK. Esto provocó un cierto rechazo, y los partidarios del trío anglo-estadounidense amenazaron con boicotear la conferencia. A Gregorio Bernardi, uno de los organizadores, le sorprendieron las críticas: «La gente se toma esto muy en serio. No nos lo esperábamos». Lo cual no parece del todo cierto: si a uno le preocupa lo suficiente el reparto del reconocimiento como para asociar los nombres de Englert y Brout a un bosón conocido universalmente como el «de Higgs», no puede sorprenderle que Guralnik, Hagen y Kibble (o sus partidarios) se molesten. La tensión se rebajó en parte cuando la Sociedad Americana de Física concedió su premio Sakurai 2010 en física teórica a Hagen, Englert, Guralnik, Higgs, Brout y Kibble (en ese orden, que parece haber sido elegido para que nadie pudiese quejarse; aunque Anderson tendría motivos razonables para hacerlo).

Como recalca Anderson decepcionado: «Si quieres que la historia sea correcta

hasta en los detalles, lo mejor es que la escribas tú mismo». En los últimos años, Guralnik, Higgs, Kibble y Brout y Englert han dejado constancia por escrito de cómo recuerdan su trabajo durante 1964, intentando así poner sus propias aportaciones en perspectiva. Y habida cuenta de la era en la que vivimos, la controversia se desató en *Wikipedia*, la enciclopedia online que cualquiera puede editar. En agosto de 2009, un usuario conocido simplemente como «Mary del CERN» publicó una nueva entrada bajo el título «1964 PRL Symmetry Breaking Papers». Ya existían entradas separadas para «Ruptura espontánea de simetría» y «Mecanismo de Higgs», y demás. Este nuevo artículo se centraba exclusivamente en cómo debería asignarse el reconocimiento y, aunque comentaba todos los artículos, era evidente por quién se decantaba: «Se puede argumentar que, aunque fueron los primeros en publicar con un par de meses de diferencia, Higgs y Brout-Englert solucionaron la mitad del problema, la obtención de masa por parte de la partícula de gauge. Guralnik-Hagen-Kibble, aunque publicado un par de meses más tarde, ofrecía una solución más completa: obtención de masa por parte de la partícula de gauge y demostración de cómo evitar la paralizante influencia del teorema de Goldstone». Pero lo que una persona puede escribir en *Wikipedia*, otra lo puede editar: la versión actual es un poco más equilibrada.

Yo no tengo ninguna preferencia sobre quién debe ganar el premio Nobel por inventar la idea del bosón de Higgs, si es que alguien lo ha de recibir, ni me veo en condiciones de hacer una predicción. Los premios son buenos para la ciencia, porque contribuyen a llamar la atención sobre trabajos interesantes que de otra manera podrían pasar desapercibidos. Pero no son lo fundamental en la ciencia: la recompensa de contribuir a descubrir el mecanismo es mucho mayor que cualquier premio que el comité del Nobel tenga a bien otorgar.

La verdadera decepción es que cuesta imaginar que algún experimentalista pueda optar al Nobel por el propio descubrimiento del bosón. Es un mero problema de números: son demasiadas las personas que han contribuido y contribuyen a los experimentos, de todas las maneras imaginables, como para

que se pueda elegir a una, dos o tres como responsables. Un logro que sin duda es digno del Nobel es la construcción del propio LHC, por lo que Lyn Evans sería un candidato razonable. Probablemente hace ya tiempo que la fundación del Nobel debería plantearse abandonar la tradición según la cual las colaboraciones no pueden ganar ninguno de los premios en ciencias. Quien consiga que ese cambio se lleve a efecto merecería el premio Nobel de la Paz.

Más allá de este horizonte

Donde nos planteamos qué hay más allá del bosón de Higgs: ¿mundos de fuerzas, simetrías y dimensiones nuevas?

Desde que tenía diez años, a Vera Rubin le fascinaban las estrellas. Su interés nunca disminuyó y, cuando llegó el momento de elegir carrera en la universidad, lo natural era que hubiese optado por la astronomía. Pero eran los años cuarenta, y las mujeres no eran precisamente bienvenidas en la ciencia. En un momento dado, habló con un empleado en la oficina de admisiones del Swarthmore College, que le preguntó si tenía otros intereses. Confesó que le gustaba pintar. Al hilo de lo cual, el empleado le preguntó: «¿Nunca te has planteado una carrera en la que pintases representaciones de los objetos astronómicos?». Rubin acabó estudiando en el Vassar College, pero la pregunta siguió resonando en su cabeza. Tiempo después recordaba: «Se convirtió en una frase recurrente en mi familia. Durante muchos años, cada vez que alguien tenía algún problema, decíamos: “¿Nunca te has planteado una carrera en la que pintases representaciones de los objetos astronómicos?”».

Rubin perseveró y cursó estudios de posgrado en Cornell y la Universidad de Georgetown. El camino no fue fácil. Cuando escribió a Princeton solicitando un catálogo de los cursos de doctorado, se negaron a enviárselo, señalando que el departamento de astronomía no aceptaba mujeres como estudiantes de doctorado. (Esa política no cambió hasta 1975.)

Un secreto del éxito como científico es mirar donde otros no han mirado. A medida que fue aumentando el tamaño de los telescopios, muchos astrónomos

dirigieron su mirada hacia los centros de las galaxias lejanas, en regiones con abundancia de estrellas y de actividad. Rubin prefirió concentrarse en la periferia, y estudiar la dinámica de la dispersa y fina capa de estrellas y de gas que orbita lentamente en sus bordes. Esta técnica constituye una manera de medir la masa total de una galaxia: cuanto más materia haya en el interior, mayor será el campo gravitatorio que actúa sobre las estrellas de la periferia, y más rápido tendrá que orbitar.

Rubin y su colaborador Kent Ford descubrieron algo asombroso. Hasta entonces pensábamos que las estrellas se movían cada vez más despacio a medida que nos alejábamos del centro de la galaxia, igual que los planetas más lejanos en el Sistema Solar orbitan más despacio alrededor del Sol. El campo gravitatorio es menos intenso, por lo que también es menor la fuerza que han de resistir, lo cual significa que la velocidad necesaria para mantenerse en órbita es más baja. Pero Rubin y Ford observaron algo muy diferente: las estrellas se mueven a la misma velocidad aunque estén cada vez más alejadas de la región central de la galaxia. La consecuencia es evidente, si bien difícil de aceptar: en una galaxia hay mucha más materia de la que observamos, y gran parte de la misma está distribuida lejos del centro, a diferencia de lo que sucede con las estrellas visibles.

Lo que Rubin y Ford habían encontrado inesperadamente es un fenómeno sorprendente que hoy en día forma parte del núcleo de la cosmología moderna: la materia oscura.

Sin embargo, no fueron los primeros en descubrirlo. Ya en los años treinta, el astrónomo suizo-estadounidense Fritz Zwicky había demostrado que en el cúmulo de galaxias Coma había mucha más materia de la que podemos observar con nuestros telescopios, y el astrónomo holandés Jan Oort demostró que en nuestro entorno galáctico local había más materia de la que resultaba evidente en un primer momento. Sin embargo, durante mucho tiempo persistió la idea de que la materia simplemente estaba «desaparecida», que se trataba de materia ordinaria pero en una forma que no era fácil de observar. A medida que fuimos

aprendiendo más sobre las galaxias y los cúmulos, y sobre el universo en su conjunto, fuimos capaces de medir con precisión dos números por separado: la cantidad total de materia en el universo y la cantidad total de «materia ordinaria» (esta última engloba átomos, polvo, estrellas, planetas y cualquier tipo de partícula conocida en el Modelo Estándar).

Los dos números no coinciden. La cantidad total de materia ordinaria en el universo constituye únicamente una quinta parte de la materia. La mayor parte es materia oscura, y esta no puede estar formada por ninguna de las partículas del Modelo Estándar.

El bosón de Higgs es la última pieza en el rompecabezas del Modelo Estándar, pero este no es en modo alguno el final del camino. La materia oscura es solo uno de los indicios de que hay mucha más física por comprender. Una perspectiva apasionante es que el bosón de Higgs haga las veces de puente entre lo que conocemos y lo que esperamos aprender. Al estudiar minuciosamente sus propiedades, confiamos en arrojar algo de luz sobre los mundos oscuros que existen más allá del nuestro.

LOS PRIMEROS INSTANTES DEL UNIVERSO

Detengámonos un poco más sobre la materia oscura, pues ofrece alguna de las evidencias más sólidas de que hay física más allá del Modelo Estándar, y constituye un gran ejemplo de cómo el Higgs puede servirnos para entender mejor esa nueva física. Una característica fundamental de la materia oscura es que no puede ser materia ordinaria (átomos y demás) en alguna forma «oscura», como las enanas marrones, los planetas o el polvo interestelar. La razón es que disponemos de mediciones muy buenas de la cantidad total de materia ordinaria, a partir de los procesos que tuvieron lugar en los primeros momentos del universo.

Para entender la materia oscura, hemos de pensar sobre cuál es su origen.

Imagine que tiene un equipo experimental que consiste básicamente en un superhorno: una caja cerrada herméticamente con alguna cosa dentro y una rueda con la que puede ajustar la temperatura a su gusto. Un horno normal podría alcanzar los 250 grados centígrados, que en las unidades que se utilizan en física de partículas son unos 0,04 electronvoltios. A esa temperatura, las moléculas pueden reordenarse (se dice que se «cocinan»), pero los átomos conservan su integridad. Una vez que alcancemos unos pocos electronvoltios, o incluso más, los electrones se separan de sus núcleos. Si llegamos a los millones de electronvoltios (MeV), los propios núcleos se descomponen, y el resultado son protones y neutrones libres.

A temperaturas elevadas también sucede otro fenómeno: las colisiones entre partículas son tan energéticas que se pueden crear nuevos pares partícula-antipartícula, como en un colisionador. Si la temperatura es mayor que la masa total de una partícula más su antipartícula, cabe esperar que estos pares se produzcan con profusión. De manera que, a temperaturas suficientemente elevadas, casi da lo mismo lo que sea que haya en el interior de la caja: lo que obtenemos es un plasma caliente compuesto por todas las partículas cuyas masas son inferiores a la temperatura en el interior. (Recuerde que tanto la masa como la temperatura pueden medirse en GeV.) Si la temperatura es de 500 GeV, nuestra caja estará repleta de bosones de Higgs, quarks, leptones, bosones W y Z y demás, zumbando de un lado a otro (por no hablar de partículas nuevas que aún no se han descubierto aquí en la Tierra). Si redujésemos gradualmente la temperatura en el interior de la caja, esas nuevas partículas irían desapareciendo de manera progresiva, cuando chocasen con sus antipartículas y se aniquilasen, y volveríamos a tener solamente las partículas de las que hemos partido.

El universo en sus primeros momentos se parece mucho al plasma en el interior de nuestro horno supercaliente, con un ingrediente adicional fundamental: el espacio se está expandiendo a un ritmo increíble. Esta expansión del universo tiene dos consecuencias importantes. La primera es que la temperatura disminuye, de manera que es como si la rueda de nuestro horno

empezase a una temperatura muy elevada y enseguida se redujese. La segunda es que la densidad de materia disminuye también rápidamente a medida que las partículas se alejan unas de otras en el espacio en expansión. Esta última característica establece una diferencia crucial entre el universo primigenio y un horno. Como la densidad disminuye, puede darse la circunstancia de que las partículas que se han creado en el plasma originario no tengan ocasión de aniquilarse con sus antipartículas, sencillamente porque sea demasiado difícil que se encuentren.

En consecuencia, obtenemos una abundancia residual de las partículas procedentes del plasma primigenio. Y, si conocemos las masas de las partículas y las probabilidades de que interactúen, podemos calcular con precisión cuál debería ser esta abundancia. Si las partículas son inestables, como el bosón de Higgs, la abundancia residual es bastante irrelevante, porque las partículas simplemente se desintegran. Pero si son estables siguen ahí. Es fácil imaginar que una partícula estable remanente del universo primigenio constituya la materia oscura actual.

En el Modelo Estándar, podemos jugar a este juego con los núcleos atómicos. Una diferencia fundamental es que empezamos teniendo más materia que antimateria, por lo que no toda la materia puede desaparecer por aniquilación. Comencemos a una temperatura suficientemente elevada, de aproximadamente 1 GeV, por ejemplo. El plasma consistirá en protones, neutrones, electrones, fotones y neutrinos (todas las partículas más pesadas se habrán desintegrado). La temperatura es suficiente para que los protones y neutrones calientes no puedan formar núcleos sin que estos se descompongan de inmediato. Pero, a medida que el universo se expande y se enfría, los núcleos se empiezan a formar pocos segundos después del big bang. Apenas un par de minutos más tarde, la densidad es tan baja que los núcleos dejan de chocar entre sí y esas reacciones se detienen. El resultado es una determinada combinación de protones y elementos ligeros: deuterio (hidrógeno pesado, un protón y un neutrón), helio y litio. Este proceso se conoce como «nucleosíntesis primordial».

Para poder calcular con precisión la abundancia relativa de esos elementos nos basta con conocer un parámetro de entrada: la abundancia inicial de protones y neutrones. Podríamos entonces comparar las abundancias primigenias de los elementos con las que observamos en el universo real. La solución encaja perfectamente, pero solo para una determinada densidad de protones y neutrones. Este feliz resultado es tranquilizador, ya que indica que nuestras ideas sobre los primeros instantes del universo van por buen camino. Puesto que los protones y los neutrones constituyen la práctica totalidad de la masa de la materia ordinaria, sabemos perfectamente cuánta materia ordinaria hay en el universo, con independencia de la forma que tome actualmente. Y no es ni remotamente suficiente como para dar cuenta de toda la materia existente.

WIMP

Una estrategia prometedora para la materia oscura consiste en jugar al mismo juego que con la nucleosíntesis, pero partiendo de una temperatura inicial mucho más elevada y añadiendo una nueva partícula a la mezcla, una partícula que será la materia oscura. Sabemos que la materia oscura es oscura, por lo que esa nueva partícula debe ser eléctricamente neutra. (Las partículas cargadas son precisamente aquellas que interactúan con el electromagnetismo, y por tanto tienden a emitir luz.) Y sabemos que aún persiste, por lo que debe ser estable, o al menos debe tener una vida media mayor que la edad del universo. Conocemos incluso un detalle más: la materia oscura no interactúa con mucha intensidad consigo misma. Si lo hiciese, se acumularía en el centro de las galaxias, en lugar de formar esos halos hinchados que parecen mostrar los datos. Por lo tanto, la materia oscura tampoco es sensible a la fuerza nuclear fuerte. De las fuerzas de la naturaleza que conocemos, la materia oscura siente sin duda la influencia de la gravedad, y puede que también la de la fuerza nuclear débil.

Imaginemos una nueva partícula de un cierto tipo: una WIMP (Weakly

Interacting Massive Particle: Partícula con Masa de Interacción Débil). (Los cosmólogos son muy ocurrentes a la hora de inventarse nombres.) Por «de interacción débil» no entendemos únicamente que «no interactúe mucho», sino que es sensible a las interacciones de la física de partículas. Para simplificar, supongamos que la WIMP tiene una masa compatible con otras partículas que intervienen en las interacciones débiles, como los bosones W y Z o el de Higgs. Alrededor de 100 GeV, pongamos, o al menos entre 10 y 1.000 GeV. Para cálculos de alta precisión, serían relevantes además otros detalles de la partícula, pero para nuestros cálculos aproximados nos basta con conocer estas propiedades básicas.

A continuación, comparamos la abundancia prevista de una WIMP como esa con la abundancia real de materia oscura. Lo que nos encontramos —asombrosamente— es que encajan a la perfección. Hay cierto margen de maniobra, relacionado con la posible existencia de otras partículas y con cuál es exactamente el proceso por el que se aniquilan las WIMP, pero el hecho de que cuadren con tanta aproximación es llamativo. La abundancia residual de las partículas estables con interacciones de una intensidad similar a la de la fuerza débil es por lo general la adecuada para dar cuenta de la materia oscura, sin necesidad de retorcer demasiado los números para que encajen.

Esta interesante coincidencia es lo que se conoce como «el milagro WIMP» y ha provocado que muchos físicos alberguen la esperanza de que el secreto de la materia oscura se encuentre en nuevas partículas con masas e interacciones similares a los bosones W, Z y Higgs. Desde luego, todas esas partículas se desintegran rápidamente, por lo que debe haber un buen motivo por el que la WIMP sea estable, pero eso no es difícil de inventar. Existen muchas otras teorías plausibles de la materia oscura —incluida una partícula llamada «axión», inventada por Steven Weinberg y Frank Wilczek, que es como un pariente muy lejano del Higgs— pero los modelos con WIMP son con diferencia los más populares.

La posibilidad de que la materia oscura sea una WIMP abre varias puertas

experimentales excitantes, precisamente porque el Higgs interactuaría con ella. De hecho, en muchos (probablemente en la mayoría, aunque es difícil llevar la cuenta) de los modelos de la materia oscura basados en WIMP, el acoplamiento más intenso entre esta y la materia ordinaria se produciría mediante el intercambio de un bosón de Higgs. El Higgs podría ser el eslabón que une nuestro mundo con la mayor parte de la materia del universo.

EL PORTAL DE HIGGS

Esta característica —la interacción a través del intercambio de bosones de Higgs— es algo que tienen en común muchas de las teorías que van más allá del Modelo Estándar. Hay un montón de partículas nuevas en lo que se conoce como «el sector oculto», y no interactúan demasiado con las partículas que hemos estudiado. El Higgs es algo más sociable que los fermiones y bosones de gauge conocidos, lo que significa que es más probable que interactúe con las nuevas partículas. Es en este sentido en el que el descubrimiento del Higgs constituye al mismo tiempo la culminación de un grandioso proyecto —la construcción del Modelo Estándar— y el pistoletazo de salida para el siguiente: la búsqueda de mundos ocultos más allá de dicho modelo. Wilczek y su colaborador Brian Patt se refieren a esta posibilidad como «el portal de Higgs» entre el Modelo Estándar y los sectores ocultos de la materia.

Al hablar de la detección del Higgs en el capítulo 9, he llamado la atención sobre su desintegración en dos fotones, mediada por un ciclo de partículas virtuales. La proporción con la que ese proceso tiene lugar en la práctica depende de todas las partículas distintas que podrían aparecer en dicho ciclo (esto es, partículas que se acoplan tanto con el Higgs como con los fotones). Dentro del propio Modelo Estándar, dicha proporción queda completamente fijada una vez que se conoce la masa del Higgs. Por lo tanto, si midiésemos esta desintegración con precisión y observásemos que se produce más rápido de lo

que esperamos, eso constituiría una importante evidencia de la existencia de nuevas partículas, aunque no las pudiésemos ver directamente. Los datos del LHC de 2011 y principios de 2012 parecían indicar que se producían más fotones de los que predice el Modelo Estándar, aunque la diferencia no era muy significativa. Sin duda, esto será algo que estudiaremos en los próximos años, a medida que dispongamos de más datos.

En un escenario de WIMP, la materia oscura está por todas partes, incluso allá donde se encuentre en este mismo momento. En nuestro entorno local, esperamos que haya aproximadamente una partícula de materia oscura por cada taza de espacio. Pero las partículas se mueven a bastante velocidad, normalmente del orden de cientos de kilómetros por segundo. En consecuencia, miles de millones de WIMP atraviesan nuestro cuerpo cada segundo. Como interactúan muy débilmente, apenas lo notamos, pues la mayoría de las WIMP nos atraviesan literalmente sin siquiera interactuar. Pero, aunque son pequeñas, las interacciones no son completamente nulas. Mediante el intercambio de un bosón de Higgs, una WIMP puede chocar con uno de los quarks que contienen los protones y los neutrones de su cuerpo. Los físicos Katherine Freese y Christopher Savage han calculado que, en modelos razonables, cabría esperar que, en un año, diez partículas de materia oscura interactúen con los átomos de un cuerpo humano. Los efectos de cada interacción individual son prácticamente insignificantes, así que no se preocupe por el riesgo de que la materia oscura sea la causante de su dolor de barriga.

No obstante, podemos utilizar este tipo de interacción para buscar materia oscura. Como en el LHC, una tarea fundamental es discernir la señal del ruido de fondo. La materia oscura no es la única cosa que puede chocar con un núcleo: la radiactividad y los rayos cósmicos lo hacen continuamente. Por ese motivo, los físicos tienen que descender bajo tierra, a pozos mineros e instalaciones especiales, donde estén lo más protegidos posible de ese molesto ruido de fondo. Allí construyen detectores que esperan pacientemente a detectar la débil señal que se producirá cuando una partícula de materia oscura pase por allí y perturbe

un núcleo. Hay dos tipos de detectores populares: los criogénicos, en los que el detector registra el calor generado cuando la partícula de materia oscura colisiona con un núcleo en el interior de un cristal a baja temperatura, y los de gas noble en estado líquido, en los que el detector mide la luz producida por centelleo cuando una partícula de materia oscura interactúa con xenón o argón líquidos.

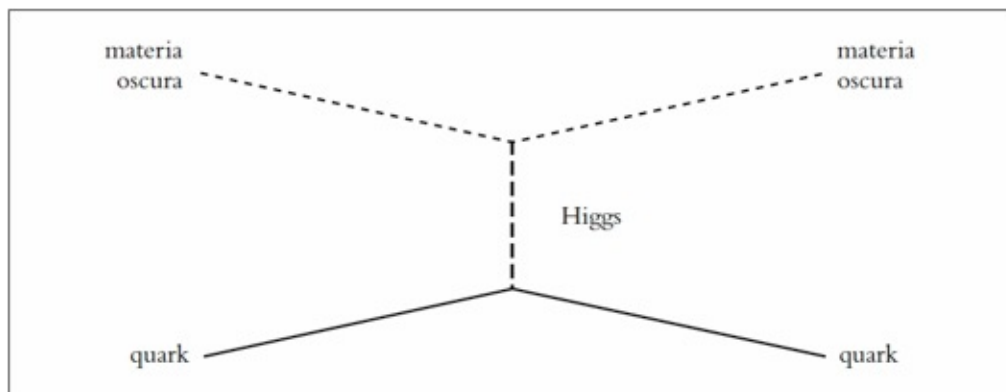


Diagrama de Feynman que representa la dispersión de una partícula de materia oscura por un quark mediante el intercambio de un bosón de Higgs.

La estrategia de meterse bajo tierra a gran profundidad para buscar interacciones con las partículas de materia oscura que nos rodean se conoce como «detección directa», y es una de las prioridades de la investigación puntera. Varios experimentos han permitido ir descartando algunos de los modelos posibles. Conocer la masa del bosón de Higgs nos permitirá relacionar las predicciones teóricas de las propiedades de la WIMP con las posibles trazas que esos experimentos podrían observar. Con la sensibilidad de esos aparatos, que ya es impresionante a día de hoy y no deja de mejorar, nadie debería sorprenderse si detectamos la materia oscura definitivamente a lo largo de los próximos cinco años. Aunque tampoco deberíamos sorprendernos si no es así. La naturaleza siempre nos reserva sorpresas.

Por supuesto, si hay una técnica llamada «detección directa», también existe otra denominada «detección indirecta». La idea en este caso es esperar a que las WIMP en nuestra galaxia o en otras choquen entre sí y se aniquilen. Entre las partículas que se produzcan en esa interacción habrá rayos gamma (fotones de alta energía), que se pueden buscar desde los observatorios situados en satélites. Actualmente, el Telescopio Espacial de Rayos Gamma Fermi de la NASA está rastreando el firmamento en busca de rayos gamma para crear una base de datos de fenómenos de alta energía. Una vez más, el problema de distinguir entre la señal y el ruido es importante. Los astrónomos se están esforzando por entender cuál debería ser el rastro de rayos gamma producido por la aniquilación de materia oscura, con la esperanza de poder así distinguirlo de los muchos procesos astrofísicos convencionales que producen radiación de este tipo. También es posible que, al aniquilarse, la materia oscura produzca un bosón de Higgs (en lugar de otras partículas a través del propio bosón de Higgs), un escenario que, como es natural, ha recibido el nombre de «Higgs en el espacio».

Por último, podemos imaginar la posibilidad de producir materia oscura aquí en casa, en el LHC. Si el Higgs se acopla con la materia oscura, y esta no es muy pesada, una de las maneras en que el Higgs se puede desintegrar es directamente en WIMP. Evidentemente, no podemos detectar estas partículas, porque interactúan muy débilmente, de manera que todas las que se produzcan se escaparán del detector, igual que los neutrinos. Pero sí podemos sumar el número total de desintegraciones de Higgs observadas y compararlo con el número esperado. Si obtenemos menos de lo que esperábamos, eso podría significar que algunas de las veces el Higgs se desintegra en partículas invisibles. Por supuesto, tardaremos un tiempo en determinar qué partículas son esas.

UN UNIVERSO NO NATURAL

La materia oscura es una evidencia sólida de que necesitamos nueva física que

trascienda el Modelo Estándar. Existe un evidente desacuerdo entre teoría y experimento, algo a lo que los físicos están acostumbrados. También hay otro tipo de evidencias de que hace falta física nueva: el ajuste fino dentro del propio Modelo Estándar.

Para especificar una teoría como el Modelo Estándar, hay que dar una lista de los campos que intervienen en ella (quarks, leptones, bosones de gauge, Higgs), pero también los valores de los distintos números que sirven como parámetros de la teoría. La intensidad de la interacción electromagnética, por ejemplo, viene determinada por un número denominado «constante de estructura fina», una magnitud famosa en la física y cuyo valor numérico es aproximadamente $1/137$. A principios del siglo xx, algunos físicos intentaron encontrar ingeniosas fórmulas numerológicas para explicar el valor de dicha constante. Hoy en día asumimos simplemente que forma parte de los datos de entrada del Modelo Estándar, aunque aún nos cabe la esperanza de que una teoría más unificada de las interacciones fundamentales nos permitiría calcularla a partir de los postulados básicos.

Aunque todos estos números son cantidades que debemos salir a medir, los físicos siguen creyendo que existen ciertos valores «naturales» que pueden tomar. El motivo es que, como consecuencia de la teoría cuántica de campos, los números que medimos representan complicadas combinaciones de muchos procesos diferentes. Básicamente, tenemos que sumar todas las diferentes contribuciones de los diversos tipos de partículas virtuales para obtener el resultado final. Cuando medimos la carga del electrón al hacer que un fotón colisione con él, no interviene solo el electrón: ese electrón es una vibración de un campo, que está rodeado por las fluctuaciones cuánticas de otros campos de todo tipo, todo lo cual se suma para darnos lo que percibimos como el «electrón físico». Cada configuración de partículas virtuales contribuye al resultado final en una determinada proporción, que a veces puede ser muy grande.

Sería muy sorprendente, por lo tanto, que el valor observado de alguna

magnitud fuese mucho menor que el de las contribuciones individuales que han dado lugar al mismo. Eso significaría que grandes contribuciones de signo positivo se han sumado a otras igualmente grandes de signo negativo para dar un resultado final minúsculo. Lo cual sin duda es posible, pero no es lo que esperaríamos. Si, al medir un parámetro, obtenemos un valor mucho menor del que esperábamos, diremos que hay un problema de ajuste fino, y que la teoría es «no natural». Desde luego, en última instancia, es la naturaleza la que decide lo que es natural, no nosotros. Pero si la teoría parece no natural, es señal de que podríamos necesitar una teoría mejor.

La mayoría de los parámetros del Modelo Estándar son bastante naturales. Con dos excepciones flagrantes: el valor del campo de Higgs en el espacio vacío y la densidad de energía del espacio vacío, también conocida como «energía del vacío». Ambos son mucho menores de lo que cabría suponer. Fíjese en que ambos están relacionados con las propiedades del espacio vacío. Lo cual es un hecho interesante, pero del que nadie ha sabido hasta el momento sacar provecho para resolver los problemas.

Ambos problemas son muy parecidos. Tanto para el valor del campo de Higgs como para la energía del vacío, podemos empezar especificando el valor que queramos, sobre el cual calcularemos las contribuciones adicionales debidas a los efectos de las partículas virtuales. En ambos casos, lo que sucede es que el resultado es cada vez mayor. Un cálculo aproximado nos dice que el valor del campo de Higgs debería ser de alrededor de 10^{16} —diez mil billones— veces mayor de lo que es en realidad. Siendo sinceros, no podemos ser demasiado precisos sobre cuál «debería» ser su valor, porque no disponemos de una teoría unificada de todas las interacciones. Nuestra estimación proviene del hecho de que las partículas virtuales tienden a hacer que aumente el valor del campo de Higgs, y existe un límite superior que no parece razonable suponer que puede superar, llamado «escala de Planck». Es la energía, unos 10^{18} GeV, a la cual la gravedad cuántica se vuelve relevante y el propio espacio-tiempo deja de tener ningún sentido definido.

Esta gigantesca diferencia entre el valor esperado y el valor observado del campo de Higgs en el vacío es lo que se conoce como un «problema de jerarquía». La diferencia entre la escala de energías que caracteriza las interacciones débiles (el valor del campo de Higgs, 246 GeV) y la que caracteriza la gravedad (la escala de Planck, 10¹⁸ GeV) es enorme. Esa es la jerarquía a la que nos referimos. Esto por sí solo ya sería bastante raro, pero recordemos que los efectos mecanocuánticos de las partículas virtuales tratan de hacer que la escala débil aumente hasta llegar a la escala de Planck. ¿Por qué son tan diferentes?

LA ENERGÍA DEL VACÍO

Por si no tuviésemos suficiente con el problema de jerarquía, el que existe con la energía del vacío es mucho peor. En 1998, los astrónomos que estudiaban las velocidades de las galaxias lejanas realizaron un asombroso descubrimiento: el universo no solo se expande, sino que lo hace cada vez más rápido. Las galaxias no solo se alejan de nosotros, sino que lo hacen cada vez a mayor velocidad. Existen varias explicaciones posibles para este fenómeno, pero hay una sencilla que encaja perfectamente con los datos que tenemos en la actualidad: la energía del vacío, que Einstein introdujo en 1917 como la «constante cosmológica».

La idea de la energía del vacío es que existe una constante de la naturaleza que nos dice cuánta energía contiene un volumen fijo de espacio completamente vacío. Si el valor no es cero —y no hay razón para que lo sea— esa energía hace que el universo se separe, lo que provoca la aceleración cósmica. El descubrimiento de que esto estaba sucediendo resultó en que el premio Nobel de 2011 recayese en Saul Perlmutter, Adam Riess y Brian Schmidt.

Brian y yo fuimos compañeros de despacho en el doctorado. En mi libro anterior, *From Eternity to Here*, relaté la historia de una apuesta que él y yo hicimos en aquella época dorada: él decía que tardaríamos al menos veinte años

en saber cuál era la densidad total de materia en el universo, mientras que yo afirmaba que la conoceríamos antes. En parte gracias a su propio trabajo, ahora estamos convencidos de que conocemos la densidad del universo, y conseguí que pagase su deuda —una pequeña botella de oporto añejo— en una emocionante ceremonia en la azotea de la Quincy House en Harvard en 2005. Con posterioridad, Brian, que es un astrónomo de renombre mundial pero un pronosticador indefectiblemente pesimista, apostó a que no conseguiríamos encontrar el bosón de Higgs en el LHC. Recientemente reconoció su derrota también en esta apuesta. Como ahora somos mayores, lo que estaba en juego asimismo ha aumentado de manera proporcional: el precio que Brian tendrá que pagar por su derrota es que, con los puntos que ha acumulado por viajar tanto en avión, nos comprará un billete para que mi mujer, Jennifer, y yo vayamos a visitarlo a Australia. Por lo menos, Brian está bien acompañado: Stephen Hawking apostó 100 dólares con Gordon Kane a que no encontraríamos el Higgs, y también ha accedido a pagarlos.

Para explicar las observaciones de los astrónomos no necesitamos que la energía del vacío sea muy elevada: basta con una diezmilésima de electronvoltio por centímetro cúbico. Como con el valor del campo de Higgs, podemos hacer una estimación rápida de cuál debería ser la magnitud de la energía del vacío. El resultado es de unos 10¹¹⁶ electronvoltios por centímetro cúbico. Lo cual es mayor que el valor observado en un factor de 10¹²⁰, un número tan enorme que ni siquiera hemos intentado inventar una palabra para él. El problema de jerarquía es grave, pero el de la energía del vacío es numéricamente mucho peor.

Entender la energía del vacío es uno de los principales problemas por resolver de la física contemporánea. Una de las muchas contribuciones que hacen que el valor estimado sea tan alto es que el campo de Higgs, con su valor no nulo en el espacio vacío, debería transportar una gran cantidad de energía (positiva o negativa). Esta fue una de las razones por las que Phil Anderson tenía sus dudas sobre lo que ahora llamamos mecanismo de Higgs: la elevada densidad de energía de un campo en el espacio vacío parece incompatible con la densidad de

energía relativamente baja que el espacio vacío posee en la práctica. Hoy en día no pensamos que esto sea suficiente para descartar el mecanismo de Higgs, simplemente porque hay muchas otras contribuciones a la energía del vacío que son incluso mayores, por lo que el problema es mucho más profundo que la contribución del Higgs.

También es posible que la energía del vacío sea exactamente cero, y que el universo se esté separando debido a una forma de energía que decae lentamente, en lugar de ser estrictamente constante. Esta idea es la que se conoce como «energía oscura» y los astrónomos están haciendo todo lo posible por comprobar si existe o no. El modelo más popular de la energía oscura contempla un nuevo tipo de campo escalar, como el de Higgs, pero con una masa extraordinariamente más pequeña. La energía de ese campo tendería gradualmente a cero, a lo largo de miles de millones de años. Entretanto, su energía se comportaría como energía oscura (con una distribución continua en el espacio, y una lenta variación en el tiempo).

El bosón de Higgs que hemos detectado en el LHC no está directamente relacionado con la energía oscura de ninguna manera, pero sí existe una conexión indirecta. Si supiésemos más sobre él, podríamos entender mejor por qué la energía del vacío es tan pequeña, o saber si la energía oscura podría tener un componente que variase lentamente en el tiempo. Es una posibilidad remota, pero ante un problema tan enconado como este debemos plantearnos seriamente cualquier posibilidad, por improbable que sea.

SUPERSIMETRÍA

Una importante lección que podemos extraer del éxito de la teoría electrodébil es que la simetría es nuestra amiga. Los físicos están fascinados con la idea de encontrar tantas simetrías como sea posible. Puede que el proyecto más ambicioso en este sentido sea uno de nombre muy apropiado, aunque poco

original: supersimetría.

Todas las simetrías básicas de las fuerzas del Modelo Estándar establecen relaciones entre partículas muy parecidas entre sí. La simetría de las interacciones fuertes relaciona los quarks de distintos colores, mientras que la de las interacciones débiles hace lo propio con los quarks up y los down, los electrones y los neutrinos electrónicos y el resto de las parejas de fermiones. La supersimetría, en cambio, es más ambiciosa, y lo que pretende es establecer relaciones entre los fermiones y los bosones. Si una simetría entre electrones y neutrinos electrónicos es como comparar manzanas y peras, tratar de conectar fermiones con bosones es como comparar plátanos y orangutanes.

A primera vista, la idea no parece muy prometedora. Decir que existe una simetría es afirmar que cierta distinción no es relevante: etiquetamos a los quarks como «rojos», «verdes» y «azules», pero no importa qué color es cada cuál. Los electrones y los neutrinos electrónicos son ciertamente diferentes, pero eso se debe a que el campo de Higgs, oculto en el espacio vacío, rompe la simetría de la interacción débil. Si el Higgs no existiese (las partes levóginas de), el electrón y el neutrino electrónico serían de hecho indistinguibles.

Si nos fijamos en los fermiones y los bosones del Modelo Estándar, parece que no existe ninguna relación entre ellos. Sus masas son distintas, sus cargas también, así como la manera en que algunas partículas son sensibles a las interacciones débiles y fuertes y otras no. Incluso el número total de partículas es completamente diferente. No hay ahí ninguna simetría oculta evidente.

Pero los físicos suelen ser perseverantes, y acabaron dando con la idea según la cual todas las partículas del Modelo Estándar tienen unos nuevos «supercompañeros», con los cuales se relacionan a través de la supersimetría. Se espera que todos estos supercompañeros sean muy pesados, por lo que aún no hemos detectado ninguno. Para celebrar esta ingeniosa idea, los físicos inventaron una nomenclatura resultona: si tenemos un fermión, le añadimos una «s-» al principio de su nombre para obtener el de su supercompañero bosón; si es un bosón, añadimos «-ino» al final del nombre para crear el de su

supercompañero fermión.

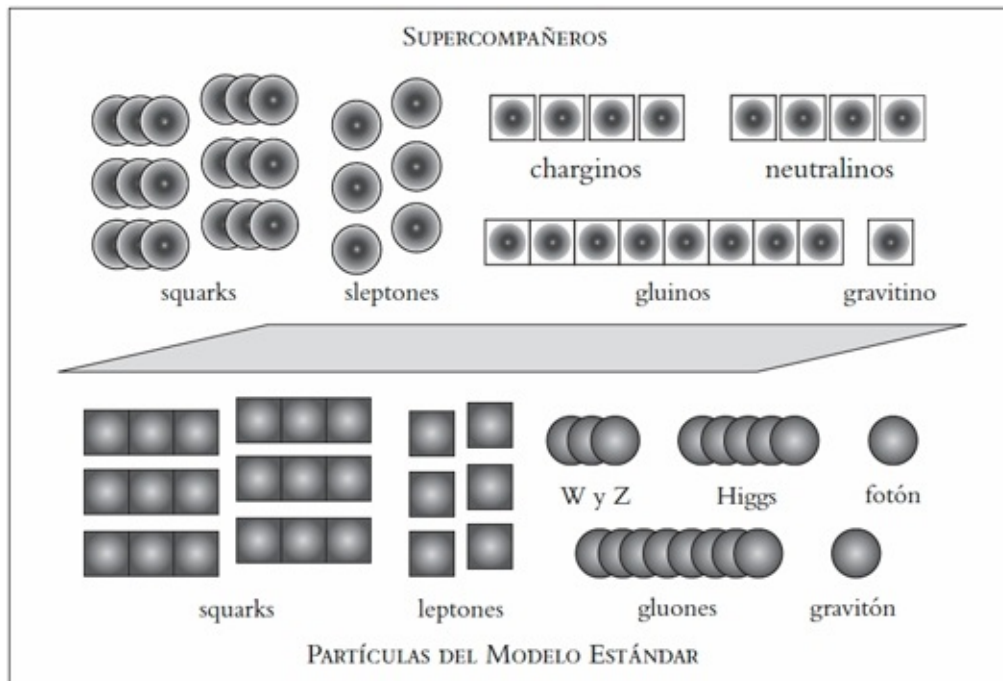
Por tanto, en supersimetría, tenemos un nuevo conjunto de bosones denominados «selectrones», «squarks», etcétera, así como un nuevo conjunto de fermiones llamados «fotoninos», «gluinos» e «higgsinos». (Como le gusta decir a Dave Barry, juro que no me lo estoy inventando.) Los supercompañeros poseen las mismas características generales que las partículas originales, salvo por el hecho de que su masa es mucho mayor y de que ha habido un intercambio entre bosones y fermiones. Así, un «stop» es el compañero bosónico de un quark top, sensible tanto a las interacciones fuertes como a las débiles y con carga $+2/3$. Curiosamente, en determinados modelos concretos de supersimetría, el stop suele ser el más ligero de los supercompañeros bosónicos, a pesar de que el top es el fermión más pesado. Los supercompañeros fermiónicos suelen combinarse entre sí, de manera que los compañeros de los bosones W y de los bosones de Higgs con carga se combinan para producir «charginos», mientras que los compañeros del Z, del fotón y de los bosones de Higgs neutros se mezclan para dar lugar a los «neutralinos».

A día de hoy, la supersimetría es una idea totalmente especulativa. Posee propiedades muy interesantes, pero no tenemos ninguna evidencia a su favor. A pesar de lo cual, sus propiedades son lo suficientemente interesantes como para que se haya convertido en la posibilidad más popular entre los físicos para la física que existiría más allá del Modelo Estándar. Por desgracia, aunque la idea fundamental es muy sencilla y elegante, es evidente que en el mundo real la supersimetría debe estar rota, pues si no las partículas y sus supercompañeros tendrían masas iguales. Una vez que se rompe la supersimetría, pasa de ser sencilla y elegante a convertirse en un auténtico caos.

Existe algo llamado «Modelo Estándar Mínimo Supersimétrico» (MSSM, Minimal Supersymmetric Standard Model), que es probablemente la manera menos complicada de incorporar la supersimetría al mundo real: tiene 120 parámetros que se deben especificar a mano. Lo cual significa que tenemos una gran libertad a la hora de construir modelos supersimétricos concretos. A

menudo, para que las cosas sean manejables, los físicos asignan un valor nulo a muchos de los parámetros, o al menos les dan el mismo valor. En la práctica, tal grado de libertad implica que es muy difícil hacer afirmaciones precisas sobre lo que la simetría predice. Para cualquier conjunto dado de restricciones experimentales, normalmente podemos encontrar un conjunto de valores de los parámetros que aún no se haya descartado.

Aparte de la búsqueda del Higgs, la tarea de encontrar la supersimetría es probablemente la más prioritaria del LHC. Habida cuenta de lo farragosa que es la teoría, incluso si la descubriésemos nos costaría un gran esfuerzo determinar que lo que hemos hallado es de hecho supersimetría. Curiosamente, una de las implicaciones de la supersimetría es que no basta con un solo bosón de Higgs. Recuerde que en el capítulo 11 hemos visto que el campo de Higgs del Modelo Estándar surge a partir de cuatro campos escalares con la misma masa, y que tras la ruptura de simetría tres de esos campos son engullidos por los bosones W y Z, lo que hace que solo podamos detectar el Higgs. Sin embargo, en las versiones supersimétricas del Modelo Estándar, resulta que, por razones técnicas, necesitamos doblar el número de campos escalares de partida, pasando de cuatro a ocho. (Sin incluir los supercompañeros fermiónicos, los higgsinos; hablamos únicamente de los campos bosónicos.) Uno de esos grupos de cuatro les proporciona su masa a los quarks de tipo up, mientras que el otro hace lo propio con los quarks de tipo down. Seguimos teniendo solo tres bosones W y Z. Cuando el Higgs adquiere un valor distinto de cero y rompe la simetría electrodébil, tres de los campos escalares son engullidos, lo cual nos deja con cinco bosones de Higgs distintos campando a sus anchas. Así es: como consecuencia directa de la supersimetría, tenemos cinco bosones de Higgs en lugar de uno solo, que es lo habitual. Uno tendrá carga eléctrica positiva, otro será negativo y los otros tres serán neutros.



Las partículas del Modelo Estándar (parte inferior) y sus supercompañeros (parte superior). Tres copias de cada quark y squark, y ocho copias de los gluones y los gluinos, representan distintos colores. En el Modelo Estándar supersimétrico hay cinco bosones de Higgs, en lugar de uno solo. Los supercompañeros de los bosones W y de los bosones de Higgs con carga se combinan entre sí para producir los charginos, mientras que los supercompañeros del Z, el fotón y los bosones de Higgs neutros hacen lo propio para dar lugar a los neutralinos.

Evidentemente, los experimentalistas estarían encantados de tener cinco bosones de Higgs. Este es uno de los motivos por los que los físicos del LHC fueron tan prudentes a la hora de anunciar que habían encontrado una nueva partícula a 125 GeV: podía ser «un» bosón de Higgs sin ser necesariamente «el» bosón de Higgs. Cuando la gente trata de construir modelos supersimétricos, es fácil hacer que uno de los Higgs sea más ligero que todos los demás, y quizá sea ese el que hemos descubierto. Sin embargo, también es habitual que el Higgs más ligero sea bastante ligero (normalmente 115 GeV o menos). Es posible llevarlo hasta los 125 GeV, pero para ello hay que hacer unas cuantas contorsiones poco naturales. Necesitamos urgentemente más datos, tanto para

saber con más seguridad qué partícula es la que se ha descubierto como para seguir buscando otras partículas.

A los físicos les alegra tener más partículas que buscar, pero en realidad eso no constituye una ventaja de la supersimetría como teoría. He aquí una ventaja más tangible: ayuda a resolver el problema de jerarquía.

El problema de jerarquía surge porque esperamos que los efectos de las partículas virtuales hagan que el valor del campo de Higgs aumente hasta llegar a la escala de Planck. Sin embargo, al examinar la situación con más detalle, vemos que los bosones virtuales tienden a tirar del valor del campo de Higgs en un sentido, mientras que los fermiones virtuales lo hacen en el sentido contrario. En general, no hay razón para esperar que estos efectos se cancelen entre sí. Normalmente, al tomar la diferencia entre dos números grandes y aleatorios, el resultado es un tercer número grande (positivo o negativo), no uno pequeño. Pero con la supersimetría todo cambia. Ahora hay campos fermiónicos y bosónicos que se compensan exactamente, y los efectos de fluctuaciones virtuales pueden cancelarse por completo, dejando intacta la jerarquía. Este es uno de los principales motivos por los que los físicos se toman en serio la supersimetría.

Otro de los motivos procede de la idea de la WIMP de materia oscura. En los modelos supersimétricos viables, el supercompañero más ligero es una partícula completamente estable con una masa y una intensidad de interacción próximas a la escala débil. Si esa partícula no posee carga eléctrica —es decir, si es un neutralino— constituye un perfecto candidato para la materia oscura. Se ha invertido una buena cantidad de esfuerzo teórico en calcular la abundancia residual de los neutralinos en los distintos modelos supersimétricos. Precisamente porque hay tantas partículas e interacciones nuevas, es posible un amplio rango de abundancias, pero no es difícil obtener la densidad correcta de materia oscura. Si los supercompañeros existen a las energías a las que el LHC tiene o tendrá acceso, cabe la posibilidad de que logremos una espectacular síntesis de la física de partículas y la cosmología. Es bueno marcarse objetivos

elevados.

CUERDAS Y DIMENSIONES ADICIONALES

La teoría de cuerdas es una de las ideas más sencillas de la historia. Imagine simplemente que los componentes elementales de la naturaleza, en lugar de ser partículas puntuales, son pequeñas cuerdas vibrantes. El origen del concepto puede remontarse a varios artículos escritos en 1968 y 1969 por Yoichiro Nambu, Holger Nielsen y Leonard Susskind, que sugirieron cada uno por su cuenta que ciertas relaciones matemáticas en la dispersión de partículas podrían explicarse simplemente si se sustituyesen las partículas por cuerdas. Siempre que los lazos o segmentos de cuerda sean suficientemente pequeños, nosotros los veremos como partículas. No hemos de preguntar: «¿De qué están compuestas las cuerdas?», como tampoco hemos tenido nunca la tentación de preguntar: «¿De qué está compuesto un electrón?». La materia que forma las cuerdas es la sustancia fundamental de la que están hechas todas las otras cosas.

Las primeras teorías de cuerdas describían únicamente bosones, y adolecían de un defecto en apariencia fatal: el espacio vacío era inestable y rápidamente se disolvería en una nube de energía. Para solucionarlo, los pioneros de la teoría de cuerdas Pierre Ramond, André Neveu y John Schwarz demostraron cómo incorporar los fermiones a la teoría. Y, al hacerlo, acabaron inventando uno de los primeros ejemplos de supersimetría. Así fue como nació la «teoría de supercuerdas». Para que quede claro: parece que los modelos viables de la teoría de cuerdas han de ser necesariamente supersimétricos, pero existen modelos supersimétricos que no guardan relación alguna con la teoría de cuerdas. Si encontrásemos partículas supersimétricas en el LHC, eso haría que aumentase la probabilidad de que la teoría de cuerdas no fuese desencaminada, pero no constituiría una evidencia directa de la existencia de las cuerdas.

Las supercuerdas resolvían el problema de estabilidad de los primeros

modelos de cuerdas, pero tenían una característica frustrante: una partícula sin masa que se acoplaba con la energía de todas las cosas. Resultaba molesto porque el objetivo original de la teoría de cuerdas era explicar la fuerza nuclear fuerte, y en las interacciones nucleares no existía ninguna partícula como esa. Entonces, en 1974, Joël Scherk y Schwarz señalaron que existe una famosa partícula sin masa que se acopla con la energía de todas las cosas: el gravitón. En lugar de ser una teoría de las interacciones fuertes, sugirieron que quizá la teoría de cuerdas era una teoría de la gravedad cuántica, así como de todas las demás fuerzas conocidas: una teoría del todo.

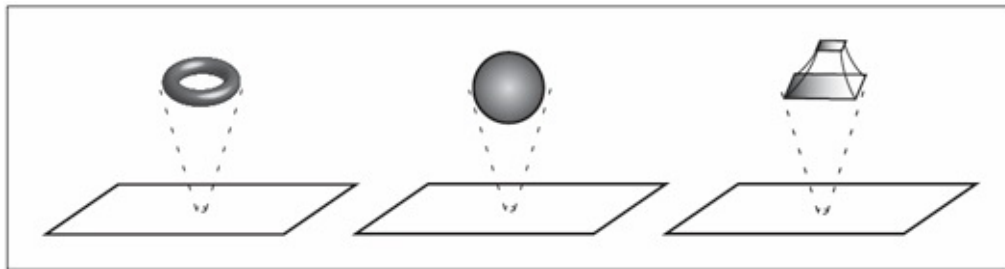
En un principio, esta idea provocó más de una mirada de perplejidad, pues a los físicos de partículas de los años setenta la gravedad no les interesaba demasiado. Sin embargo, ya en 1984 estaba claro que el Modelo Estándar ofrecía una buena explicación de la física de partículas, y los teóricos andaban a la busca de nuevos retos. En ese año, Michael Green y Schwarz demostraron que la teoría de supercuerdas era capaz de evitar un problema de consistencia matemática que, en opinión de muchos, haría que la teoría no fuese viable. Igual que la popularidad de la teoría electrodébil aumentó rápidamente una vez que 't Hooft demostró que es renormalizable, el tren de la teoría de cuerdas dio un buen acelerón tras el artículo de Green y Schwarz, y desde entonces ha sido una parte importante de la teoría de partículas.

La teoría de cuerdas necesita resolver otro problema: la dimensionalidad del espacio-tiempo. La teoría cuántica de campos es más flexible que la teoría de cuerdas, y existen teorías de campos razonables para todo tipo de espacio-tiempos. Pero la teoría de supercuerdas es más restrictiva: las primeras investigaciones comprobaron que la teoría de forma natural quiere vivir en un espacio-tiempo con exactamente diez dimensiones. De ellas, nueve serían espaciales y una temporal, lo que contrasta con las habituales tres dimensiones espaciales y una temporal. Llegados a este punto, sería comprensible que los pusilánimes prefiriesen pasar a otras ideas.

Pero los teóricos de cuerdas estaban encantados con la posibilidad de

incorporar la gravedad al resto de las fuerzas conocidas, y siguieron adelante. Tomaron prestada una antigua idea que Theodor Kaluza y Oskar Klein ya habían estudiado en los años veinte: la posibilidad de que algunas dimensiones del espacio estén ocultas y enrolladas en una bola diminuta, demasiado pequeña como para que la podamos observar, o siquiera analizar, en los detectores de partículas de alta energía. Un cilindro, como una pajita o una manguera, tiene dos dimensiones —arriba y abajo longitudinalmente y alrededor del círculo—, pero si lo vemos desde lejos nos parecerá que es una línea unidimensional. Desde este punto de vista, un cilindro lejano es una línea con un minúsculo círculo compacto en cada uno de sus puntos. Recuerde que las longitudes de onda cortas se corresponden con energías altas. Si un espacio compacto es suficientemente pequeño, solo las partículas con energías extremadamente elevadas se darán cuenta de que está ahí.

Esta idea de la «compactación» de las dimensiones adicionales se convirtió en un elemento importante de los intentos de conectar la teoría de cuerdas con fenómenos observables. A un nivel fundamental, la libertad para crear distintas versiones de la teoría de cuerdas es muy limitada: trabajos realizados en los años ochenta demostraron que en realidad solo hay cinco teorías de cuerdas. Pero cada una incorpora un espacio-tiempo de diez dimensiones, y si se quiere ocultar seis de ellas resulta que existen muchas maneras diferentes de llevar a cabo la compactación. Aunque serían necesarias energías muy altas (presumiblemente del orden de la energía de Planck propia de la gravedad cuántica, 10^{18} GeV) para estudiar directamente una variedad compacta, las características de la compactación afectan directamente a la física que se observa a bajas energías. Por «características de la compactación» nos referimos a su volumen, su forma y su topología; compactar sobre un toro (la superficie de una rosquilla) será muy diferente a hacerlo sobre una esfera (la superficie de una bola). Y por «la física que se observa a bajas energías» entendemos qué tipo de fermiones hay, qué fuerzas existen y cuáles son los valores de las diversas masas e intensidades de interacción.



Tres modelos distintos de compactación. Lo que para un observador macroscópico parece un punto, tras una inspección más detallada se revela como un espacio de varias dimensiones. De izquierda a derecha: un toro (la superficie de una rosquilla), una esfera (la superficie de una bola) y el espacio curvo que se extiende entre dos branas. Las compactaciones realistas implican un mayor número de dimensiones, algo difícil de ilustrar.

Por lo tanto, aunque la teoría de cuerdas en sí misma es absolutamente singular, establecer la conexión entre esta y los experimentos ha resultado ser bastante difícil. Sin saber cómo están compactadas las dimensiones adicionales, es imposible decir mucho sobre qué predicciones ofrecería la teoría para el mundo observable. Este es un problema bastante general de cualquier intento de aplicar la mecánica cuántica a la gravedad, no es exclusivo de la teoría de cuerdas: los análisis experimentales directos requieren energías del orden de la escala de Planck, que ningún acelerador de partículas que podamos construir alcanzará jamás. Lo cual no significa que nunca vayamos a disponer de datos que nos permitan poner a prueba nuestros modelos de gravedad cuántica, pero esas pruebas van a exigir más maña que fuerza bruta.

LAS BRANAS Y EL MULTIVERSO

En los años noventa, la manera en que la gente estaba intentando establecer una conexión entre la teoría de cuerdas y la realidad experimentó un cambio

espectacular. El impulso para este cambio se debió al descubrimiento por parte de Joseph Polchinski de que la teoría de cuerdas no es simplemente una teoría de cuerdas unidimensionales, sino que existen también objetos multidimensionales que desempeñan un papel fundamental.

Una superficie bidimensional se denomina «membrana», pero los teóricos de cuerdas necesitaban poder describir también objetos de tres o más dimensiones, por lo que adoptaron la terminología «2-brana», «3-brana», etcétera. Una partícula es una cero-brana, y una cuerda es una 1-brana. Utilizando estas branas adicionales, los teóricos de cuerdas demostraron que su teoría es aún más particular de lo que habían pensado: las cinco teorías de supercuerdas con diez dimensiones —así como una teoría de «supergravedad» de once dimensiones que no incorpora ninguna cuerda— son simplemente distintas versiones de una «teoría M» más fundamental. (A día de hoy, nadie sabe realmente qué se supone que significa esa «M».)

La mala noticia es que esta profusión de branas llevó a los teóricos de cuerdas a descubrir todavía más maneras de compactar las dimensiones adicionales. En parte, esto se debió a los intentos de encontrar compactaciones que incorporasen una magnitud positiva de la energía del vacío, algo exigido por el descubrimiento en 1998 de que el universo está acelerándose (una de las raras ocasiones en que el progreso en la teoría de cuerdas vino instigado por los experimentos). Lisa Randall y Raman Sundrum se basaron en la teoría de branas para desarrollar un tipo completamente nuevo de compactación, en el que el espacio «se curvaba» entre dos branas. Esto condujo a una rica variedad de nuevas aproximaciones hacia la física de partículas, incluidas nuevas maneras de enfrentarse al problema de jerarquía.

Por desgracia, también acabó aparentemente con las esperanzas que aún quedaban de que al encontrar la compactación «correcta» podríamos de alguna manera conectar la teoría de cuerdas con el Modelo Estándar. El número de compactaciones del que estamos hablando es difícil de estimar, aunque se han manejado números del orden de 10500. Eso son muchas compactaciones, y más

cuando la tarea que tenemos ante nosotros consiste en revisarlas todas en busca de la que encaje con el Modelo Estándar.

En respuesta, algunos de los impulsores de la teoría de cuerdas optaron por tomar una dirección diferente: en lugar de encontrar la única compactación verdadera, imaginan que distintas partes del espacio-tiempo se caracterizan por diferentes compactaciones, y que cada una de las compactaciones existe en algún lugar. Como las compactaciones definen las partículas y las fuerzas que se observan a bajas energías, esto es como si las leyes de la física fuesen distintas en diferentes regiones. Podemos entonces decir que cada una de estas regiones es un «universo» separado, y llamar «multiverso» al conjunto de todos ellos.

Podría parecer que esta idea supone la renuncia a cualquier pretensión de realizar predicciones comprobables. Sin duda es difícil, pero los defensores del multiverso aseguran que aún hay esperanza. Afirman que en muchas zonas del multiverso las condiciones son tan inhóspitas que en ellas no podría surgir ninguna forma de vida inteligente. Puede que no existan las fuerzas apropiadas, o que la energía del vacío sea tan alta que incluso los átomos individuales se descompongan por la expansión del universo. Un problema es que no entendemos muy bien cuáles son las condiciones en las que puede surgir la vida. No obstante, si pudiésemos dejar de lado consideraciones tan mundanas como estas, los optimistas aún conservan la esperanza de que podrían hacer predicciones sobre lo que verían unos observadores en el multiverso. Dicho de otro modo, incluso aunque no veamos otros «universos» directamente, podríamos utilizar la idea del multiverso para hacer predicciones comprobables. El «principio antrópico» es la idea según la cual existe un potente efecto de selección que restringe las condiciones que podríamos observar a aquellas que son compatibles con nuestra existencia.

Es un plan ambicioso, posiblemente abocado al fracaso. Pero hay quien lo intenta, y en particular han aplicado esta idea a las propiedades del bosón de Higgs. Estas son aguas peligrosas: ya en 1990, Mijaíl Shaposhnikov e Ígor Tkachev trataron de predecir la masa del Higgs bajo determinadas suposiciones

antrópicas y obtuvieron un valor de 45 GeV. Lo cual es claramente incompatible con los datos de los que ahora disponemos, por lo que es evidente que esas suposiciones contenían algún error. Bajo otras suposiciones distintas, en 2006, otro grupo predijo un valor de 106 GeV, que se aproximaba más, pero tampoco acertaba. Ahora que tenemos un bosón de Higgs de 125 GeV es poco probable que se publiquen muchas predicciones que no consigan de alguna manera dar con ese valor.

Para ser justos, debemos mencionar el éxito más impresionante del razonamiento antrópico: la predicción del valor de la energía del vacío. En 1987, más de diez años antes del descubrimiento de la aceleración del universo, Steven Weinberg señaló que una energía del vacío muy alta (o de valor negativo muy grande) impediría la formación de las galaxias. Por lo tanto, la mayoría de los observadores en un multiverso deberían ver valores pequeños pero no nulos de la energía del vacío. (Cero es un valor permitido, pero hay más números distintos de cero que números iguales a cero.) El valor que creemos haber observado es perfectamente compatible con la predicción de Weinberg. Por supuesto, Weinberg estaba imaginando implícitamente un multiverso en el que lo único que cambiase de una zona a otra fuese la energía del vacío. Si permitimos que varíen también otros parámetros, la concordancia es mucho menos impresionante.

A pesar del tono pesimista, incluso reticente, de esta sección, creo que el escenario del multiverso es de hecho bastante plausible. (En *From Eternity to Here* sugería que podría ser útil para explicar la baja entropía del universo primigenio.) Si la teoría de cuerdas o alguna otra teoría de la gravedad cuántica dejan espacio para diferentes manifestaciones de las leyes locales de la física en distintas regiones del espacio-tiempo, el multiverso podría ser real, con independencia de que podamos observarlo o no. Y yo siempre he defendido que debemos tomarnos en serio las cosas que podrían ser reales. Sin embargo, con nuestros conocimientos actuales, estamos muy lejos de poder convertir el multiverso en una teoría predictiva para la física de partículas. No podemos dejar

que nuestra aversión personal empañe nuestro juicio sobre los escenarios cosmológicos, pero tampoco debemos permitir que nuestro entusiasmo nuble nuestras facultades críticas.

AVENTURÁNDONOS MÁS ALLÁ

Hay muchas más cosas por descubrir en el ámbito de lo muy pequeño, y hay muchos otros aspectos de la física de partículas que van más allá del Modelo Estándar. ¿Por qué hay más materia que antimateria en el universo? Varios de los escenarios que se han planteado para generar tal asimetría implican la evolución cosmológica del campo de Higgs, por lo que es plausible que una mejor comprensión de sus propiedades nos ofrezca nuevas maneras de abordar este problema. También existen interesantes modelos «tecnicolor», según los cuales el Higgs es una partícula compuesta, como el protón, y no algo fundamental. Hay otros datos de la física de partículas que no parecen encajar con las versiones actuales del technicolor, pero el estudio del Higgs podría depararnos sorpresas.

Descubrir el Higgs no es el fin de la física de partículas. El Higgs era la última pieza del Modelo Estándar, pero es también una ventana hacia la física más allá de esa teoría. En los años venideros utilizaremos el Higgs para buscar (y, si hay suerte, estudiar) la materia oscura, la supersimetría, las dimensiones adicionales y cualquier otro fenómeno que sea necesario para que la teoría cuadre con los nuevos datos que vamos conociendo. El descubrimiento del Higgs supone el final de una era y el principio de otra.

Que merezca la pena defenderlo

Donde nos preguntamos por qué la física de partículas merece la pena y reflexionamos sobre lo que está por venir.

En 1969, el Comité Conjunto del Congreso sobre Energía Atómica citó a Robert Wilson, el físico encargado de la construcción del Fermilab, para que ayudase a los senadores y congresistas a entender los motivos de un proyecto que costaría muchos millones de dólares. Supuso un punto de inflexión en la historia de la física de partículas en Estados Unidos. El Proyecto Manhattan había propiciado que aumentasen tanto su influencia como su financiación, pero no estaba claro de qué manera la búsqueda de nuevas partículas elementales tendría algún resultado tangible, como un nuevo tipo de arma. El senador John Pastore, de Rhode Island, le preguntó a Wilson directamente: «¿Hay algún aspecto de las esperanzas puestas en este acelerador que guarde alguna relación con la seguridad de este país?».

Wilson respondió de manera igualmente directa: «No, señor. Creo que no.»

Es fácil suponer que esta respuesta sorprendió a Pastore. Probablemente esperaba escuchar toda una retahíla de motivos por los que el Fermilab era fundamental para seguir la estela de los soviéticos, un argumento que en esa época se utilizaba para prácticamente cualquier cosa. Pastore preguntó si en realidad no había nada en absoluto, a lo que Wilson simplemente respondió: «Nada de nada». Pero uno no llega a ser senador si no es al menos un poco testarudo, así que Pastore lo intentó por tercera vez, para confirmar que había oído bien: «¿No tiene ningún valor en ese sentido?».

Wilson no tenía un pelo de tonto. Se dio cuenta de que se esperaba algo más de él si quería que el Congreso financiase su ambicioso pero esotérico proyecto, pero se negó a recular. Su respuesta es una de las más citadas en la larga historia de frases con las que los científicos intentan explicar qué es lo que hacen:

Solo tiene que ver con el respeto con que nos miramos unos a otros, con la dignidad del ser humano, con nuestro amor por la cultura. Tiene que ver con si somos buenos pintores, buenos escultores, grandes poetas, con todas esas cosas que realmente veneramos en este país y que exaltan nuestro patriotismo. No tiene nada que ver directamente con la defensa de nuestro país salvo porque hace que merezca la pena defenderlo.

La Gran Ciencia no es barata. El Gran Colisionador de Hadrones ha costado alrededor de 9.000 millones de dólares, en su gran mayoría procedentes de los impuestos recaudados en muchos países de todo el mundo. La gente que pagó ese dinero tiene derecho a saber qué es lo que obtendrá a cambio de su inversión. A la comunidad científica le corresponde ser todo lo sincera y convincente que pueda sobre los beneficios de la investigación básica.

Algunos de estos beneficios toman la forma de avances tecnológicos. Pero, en última instancia, esos no son los más importantes. Lo realmente importante es el conocimiento que adquirimos gracias a estos experimentos tan ambiciosos.

No todo el mundo está de acuerdo. Steven Weinberg, que ha sido un infatigable defensor de la inversión en ciencia básica, recuerda una anécdota:

Durante el debate sobre el SSC, estaba en el programa de radio de Larry King con un congresista que se oponía a su construcción. Decía que no estaba en contra de la inversión en ciencia, pero que teníamos otras prioridades. Le expliqué que el SSC nos ayudaría a entender las leyes de la naturaleza, y le pregunté si no le parecía que eso era algo prioritario. Recuerdo perfectamente cada palabra de su respuesta. Fue: «No».

No es una actitud poco frecuente. Pero sí es un punto de vista empobrecedor, incapaz de contemplar el panorama en toda su extensión. Puede que la ciencia básica no dé lugar a mejoras inmediatas para la defensa nacional o a la cura del

cáncer, pero enriquece nuestras vidas al permitirnos conocer mejor el universo del que formamos parte. Y eso debería ser algo muy prioritario.

¿CUÁNDO TENDRÉ MI MOCHILA A PROPULSIÓN?

Lo cual no significa de ninguna manera que no nos gustaría que el trabajo que se lleva a cabo actualmente en física de partículas tuviese aplicaciones tecnológicas útiles. Los científicos se apresuran a señalar que la investigación básica —la investigación científica que constituye un fin en sí misma, que no se lleva a cabo buscando aplicaciones tecnológicas inmediatas— ha acabado teniendo muy a menudo consecuencias enormemente prácticas, aunque no se hubiesen podido prever con antelación. De la electricidad a la mecánica cuántica, las páginas de la historia están repletas de ideas que en su momento se consideraron abstractas y poco prácticas, pero más tarde acabaron siendo fundamentales para el progreso tecnológico. En consecuencia, cada vez que se realiza un nuevo descubrimiento científico, la gente quiere saber: ¿cuándo tendré mi mochila a propulsión?

¿Podemos imaginar que la investigación que se lleva a cabo en el LHC corra una suerte similar? Como decía Yogi Berra, es difícil hacer predicciones, especialmente sobre el futuro. Sin embargo, sí podemos imaginar que lo que encontremos en el LHC podría tener un carácter muy distinto a la física fundamental de los últimos siglos. Es posible que ninguna de las partículas que descubramos en el LHC tenga nunca ninguna aplicación práctica.

No es mero pesimismo, sino que tiene que ver con el tipo particular de cosas que esperamos descubrir. Cuando Benjamin Franklin estaba estudiando la electricidad, o cuando Heinrich Hertz producía ondas de radio, no estaban creando cosas que no existiesen ya en el mundo. La electricidad y las ondas de radio existen a nuestro alrededor, y no provienen únicamente de fuentes artificiales. Los científicos de aquella época estaban aprendiendo a manipular misteriosas propiedades del mundo que tenían a su alcance, y no es sorprendente

que los conocimientos que adquirieron al hacerlo resultaran de utilidad práctica más adelante. En el LHC, sin embargo, estamos creando literalmente partículas que no existen en nuestro entorno cotidiano. Y hay buenos motivos para ello. Las partículas son normalmente muy masivas, por lo que se necesita una enorme cantidad de energía para crearlas. Y, además, o bien interactúan muy débilmente, de manera que es difícil capturarlas o manipularlas (como los neutrinos), o bien tienen una vida media extremadamente breve, y se desintegran antes de que se les pueda dar ningún uso.

Tomemos el bosón de Higgs como ejemplo. No es fácil producir un bosón de Higgs. La única manera de hacerlo que conocemos es con un acelerador de varios kilómetros de longitud. Podemos, qué duda cabe, imaginar mejoras tecnológicas que nos permitiesen tener un aparato de bolsillo capaz de alcanzar energías tan altas. Nadie tiene ni idea de cómo hacerlo, pero no violaría las leyes de la física. Por otra parte, si dispusiésemos de un iHiggs productor de bosones, ¿para qué nos serviría? Cada bosón de Higgs que se produce se desintegra en menos de un zeptosegundo. Cuesta imaginar alguna aplicación práctica de estos bosones que no se realizase de manera más eficiente con otras partículas.

No obstante, este argumento tiene sus puntos débiles, desde luego. Los muones son partículas inestables y se les han encontrado potenciales aplicaciones tecnológicas, desde catalizar la fusión nuclear a buscar cámaras ocultas en las pirámides. Pero el muón tiene una vida media de aproximadamente una millonésima de segundo, mucho más larga que la del bosón de Higgs. Los neutrinos son estables, si bien interactúan débilmente, y algún visionario ha imaginado la posibilidad de usarlos con fines de comunicación. Si nos sintiésemos particularmente optimistas, podríamos imaginar que el descubrimiento de partículas de materia oscura se utilizase para fines similares. Ahora bien, no es algo en lo que yo recomendaría que se invirtiese mucho dinero.

VIAJES A LA VELOCIDAD DE LA LUZ Y LEVITACIÓN

Puesto que el Higgs es el responsable de que las partículas adquieran masa, hay quien se pregunta si el hecho de dominar sus propiedades nos permitirá crear cosas más ligeras o más pesadas. O cosas peores. Al día siguiente del anuncio del descubrimiento del Higgs, el 4 de julio, el periódico canadiense *National Post* publicó un atrevido titular: «El descubrimiento del bosón de Higgs podría posibilitar los viajes a la velocidad de la luz, según los científicos». Ninguno de los científicos mencionados en el artículo decía nada parecido, pero supongo que es posible que algún científico en algún lugar en algún momento haya dicho algo así.

Utilizar el Higgs para hacer que las cosas sean más ligeras o más pesadas es básicamente imposible, por varias razones. La más obvia es que la mayor parte de la masa de los objetos ordinarios no procede del Higgs, sino de la energía debida a la interacción fuerte que existe en el interior de los protones y los neutrones. Pero lo que es más importante es que en realidad es el campo de Higgs, no el bosón de Higgs, el que proporciona masa a los quarks y a los leptones con carga. Si quisiésemos, por ejemplo, hacer que variase la masa del electrón, no tendríamos que bombardearlo con bosones de Higgs, sino que deberíamos alterar el valor del campo de Higgs.

Y eso es más fácil decirlo que hacerlo. Por una parte, aunque podemos imaginar que fuésemos capaces de alterar el campo de Higgs, no tenemos ni idea de cómo hacerlo. Por otra, sería necesaria una cantidad desorbitante de energía. Imaginemos que hemos encontrado la manera de desplazar el campo de Higgs de su valor normal (246 GeV) hasta cero, en el interior de un volumen pequeño pero macroscópico. El valor habitual que tiene el campo de Higgs es el estado de menor energía en el que puede encontrarse. Si lo desplazamos hasta el cero, eso significa que nuestro pequeño volumen está ahora repleto de energía. Según $E = mc^2$, eso significa que posee masa. Un cálculo rápido revela que un volumen del tamaño de una pelota de golf, dentro del cual el campo de Higgs se hubiese

desplazado hasta el cero, tendría aproximadamente la misma masa que toda la Tierra. Si lo hiciésemos mucho más grande, sería tal la masa contenida en un espacio pequeño que todo el volumen colapsaría para dar lugar a un agujero negro.

Por último, incluso aunque de alguna manera consiguiésemos desconectar el campo de Higgs, por ejemplo en nuestro cuerpo, no seríamos los únicos en perder peso. Determinadas partículas elementales (electrones y quarks) también se volverían más ligeras, y se restauraría la simetría ahora rota de la interacción débil. Como consecuencia de ello, los átomos y las moléculas de nuestro cuerpo pasarían a encontrarse en configuraciones completamente distintas, y la mayoría de ellos se desintegrarían completamente, liberando una enorme cantidad de energía. Si disminuyese el valor del campo de Higgs, no adelgazaríamos, sino que nuestro cuerpo explotaría.

Así que no espere que aparezca ningún aparato de levitación basado en el Higgs en el futuro próximo. Por otra parte, sigue siendo perfectamente posible que nuevos descubrimientos en el LHC pongan los cimientos para futuras aplicaciones que a día de hoy somos incapaces de prever. Aunque no sea ese el motivo por el que vamos tras ellos.

PRODUCTOS DERIVADOS

La investigación en física de partículas con frecuencia se concreta en beneficios muy tangibles. Estos suelen tomar la forma de productos derivados: nuevas tecnologías que se desarrollan para hacer frente a las dificultades que plantea el propio proyecto experimental, en lugar de ser aplicaciones directas del descubrimiento de nuevas partículas.

El ejemplo más claro es la World Wide Web. Tim Berners-Lee, que trabajaba en el CERN, inventó la web cuando buscaba la manera de facilitar que los físicos compartieran la información. Ahora cuesta imaginar un mundo sin ella.

Nadie sugirió nunca que se financiase el CERN porque algún día inventarían la WWW. Se trata simplemente de reunir a gente inteligente en el entorno propicio y hacer que se enfrenten a imponentes retos tecnológicos, y después recoger los beneficios resultantes.

Hay muchos otros ejemplos similares. La necesidad de alimentar los imanes extraordinariamente potentes de los aceleradores de partículas ha dado lugar a notables progresos en la tecnología de los superconductores. La capacidad de manipular las partículas ha encontrado aplicaciones en medicina, en la esterilización y análisis de alimentos y en otras áreas de la ciencia como la química y la biología. Los detectores resistentes y de alta precisión que se utilizan en los experimentos con partículas también se emplean ahora en medicina para pruebas de radiación y en seguridad. Las extraordinarias exigencias en cuanto a capacidad de computación y transferencia de información entre los físicos de partículas han propiciado avances en la tecnología de los ordenadores. La lista es muy larga, pero la lección está bien clara: el dinero que se gasta en la búsqueda de partículas esotéricas no es en balde.

Es difícil cuantificar exactamente cuál es el grado de eficiencia de la inversión en investigación básica. Los estudios realizados por el economista Edwin Mansfield sugieren que, para la sociedad en su conjunto, es sin duda una inversión acertada. Mansfield argumenta que la inversión pública en ciencia básica proporciona en promedio un retorno del 28 por ciento, algo que prácticamente cualquiera estaría encantado de obtener con su cartera de inversiones. Una cifra como esa es en el mejor de los casos sugerente, porque los detalles dependen en gran medida de cuáles son los sectores objeto de estudio y qué se entiende por «ciencia básica». Pero refuerza la impresión de que, cuando hablamos de ciencia puntera, incluso la investigación más alejada de la aplicación directa acaba dando dividendos impresionantes.

El producto derivado más importante de la investigación básica no es en absoluto tecnológico: es la inspiración que la ciencia ofrece a personas de todas las edades. ¿Quién sabe cuándo algún chaval, al escuchar las noticias sobre el

bosón de Higgs, podría interesarse por la ciencia, empezar a estudiar, y acabar convirtiéndose en un médico o ingeniero de talla mundial? Cuando la sociedad dedica una pequeña proporción de su riqueza a plantearse y dar respuesta a las grandes cuestiones, nos recuerda a todos la curiosidad que sentimos por este universo en el que vivimos. Y esto tiene toda clase de consecuencias positivas.

EL FUTURO DE LA FÍSICA DE PARTÍCULAS

Dejando aparte al malhumorado congresista de Weinberg, la mayoría de la gente está dispuesta a reconocer que aprender cuáles son las leyes de la naturaleza es un proyecto que merece la pena. No obstante, es razonable preguntar exactamente cuánto creemos que merece la pena. El recuerdo del destino que corrió el Supercolisionador Superconductor se cierne como una sombra amenazadora sobre cualquiera que reflexione sobre el futuro de la física de partículas. Vivimos en una era en la que no sobra el dinero, y los proyectos costosos se han de justificar. El LHC es un logro asombroso y, con suerte, seguirá funcionando durante muchos años más, pero llegará el momento en que habremos aprendido de él todo lo que podía enseñarnos. ¿Y entonces qué?

El problema es que, aunque la inmensa mayoría de los proyectos científicos interesantes son mucho menos costosos que los aceleradores de partículas de alta energía, hay ciertas cuestiones que no podemos abordar sin máquinas como esas. El LHC costó aproximadamente 9.000 millones de dólares, y nos ha dado el bosón de Higgs y, con suerte, nos brindará muchas otras cosas en el futuro. Si nos hubiésemos limitado a invertir 4.500 millones de dólares en el proyecto, no habríamos descubierto medio bosón de Higgs ni habríamos tardado el doble en descubrirlo. Simplemente no habríamos encontrado nada. Para producir nuevas partículas se necesitan altas energías y luminosidades sustanciales, que a su vez requieren una gran cantidad de equipos de precisión y de experiencia, cosas ambas que cuestan dinero. Sobre el júbilo por el maravilloso rendimiento del

LHC se cierne la posibilidad muy real de que sea el último acelerador de alta energía que se construya en muchos años.

No es que escaseen las ideas sobre cuáles pueden ser los siguientes pasos, si es que se encuentra el dinero para darlos. Se podrían introducir mejoras en el propio LHC para que alcanzase energías más altas, aunque eso parece una solución temporal. La atención se ha centrado más bien en la posibilidad de un nuevo colisionador lineal (en línea recta, en lugar de en forma de anillo), que haría colisionar electrones y positrones. Una propuesta es el denominado Colisionador Lineal Internacional (ILC, International Linear Collider), que tendría más de treinta kilómetros de longitud y alcanzaría energías de 500 GeV o incluso de 1 TeV.

Parece menos energía que el LHC, lo cual se podría entender como un retroceso, pero los colisionadores positrón-electrón funcionan de manera distinta que los de hadrones. En lugar de invertir toda la energía posible en las colisiones y ver qué es lo que sale de ellas, las máquinas electrón-positrón son ideales para trabajos de precisión, empleando exactamente la energía necesaria para producir determinada partícula. Ahora que creemos que el Higgs se encuentra a 125 GeV, este sería un objetivo tentador para la física que se llevaría a cabo en un acelerador lineal.

Las estimaciones del coste del ILC van desde los 7.000 a los 25.000 millones, y se han barajado posibles sedes en Europa, Estados Unidos y Japón. Evidentemente, el proyecto requeriría una importante colaboración internacional y un alto grado de experiencia, tanto en lo que se refiere a la política como a la física experimental. En el CERN se ha desarrollado una propuesta alternativa, el Colisionador Lineal Compacto (CLIC, Compact Linear Collider). Tendría una longitud menor pero alcanzaría energías más elevadas mediante el empleo de tecnologías innovadoras (y por lo tanto más arriesgadas). En 2012, los estudios sobre los dos proyectos en liza se combinaron bajo un paraguas único. El nuevo responsable del proyecto unificado será Lyn Evans, que no pudo disfrutar durante mucho tiempo de su jubilación tras abandonar el equipo del CERN.

Evans será el encargado de decidir cuál es la tecnología más prometedora para seguir avanzando, así como quien tendrá que hacer juegos malabares con los intereses de los distintos países que estarían encantados de acoger un nuevo colisionador (pero que no quieren pagar por él).

Uno de los asuntos en los que insiste cualquiera que haya participado en el LHC es la inspiración que emana del éxito de su modelo de colaboración internacional. Científicos y técnicos de muy diversas nacionalidades, edades y procedencias se han unido para construir algo más grande que todos ellos. Si nuestra sociedad en su conjunto es capaz de encontrar la fuerza de voluntad para dedicar sustanciales recursos a crear nuevas instalaciones, el futuro de la física de partículas será brillante. Pero, para que esto suceda, los científicos han de comunicar al gran público el interés y la importancia de lo que hacen. No se puede vender la física de partículas diciendo que algún día podría curar el Alzheimer o dar lugar a dispositivos portátiles de teletransportación. Hemos de decir la verdad: queremos descubrir cómo funciona la naturaleza. Es la humanidad en su conjunto la que debe decidir qué valor le da a esto.

ASOMBRO

Al entrevistar a mis colegas físicos para el libro, me sorprendió cuántos de ellos habían sentido una fascinación por las artes antes de acabar dedicándose a la ciencia. Fabiola Gianotti, Joe Incandela y Sau Lan Wu estudiaron arte o música cuando eran jóvenes; David Kaplan se graduó en realización.

No es una coincidencia. Aunque nuestra búsqueda para entender cómo funciona la naturaleza a menudo conduce a aplicaciones prácticas, pocas veces es ese el motivo que despierta el interés en la gente. La pasión por la ciencia surge a partir de una sensibilidad estética, no práctica. Descubrimos algo nuevo sobre el mundo, y eso nos permite apreciar mejor su belleza. A primera vista, las interacciones débiles son un caos: los bosones que transmiten la fuerza poseen

distintas masas y cargas, y también es diferente la intensidad con la que interactúan con distintas partículas. Pero cuando profundizamos, aparece ante nosotros un mecanismo elegante: una simetría rota, oculta a nuestros ojos por un campo que se extiende por todo el espacio. Es como poder leer poesía en el idioma original, en lugar de tener que conformarse con traducciones mediocres.

Hace poco estuve ayudando a un programa de televisión que pretendía explicar el bosón de Higgs. En televisión, nunca basta con usar solo palabras, hay que utilizar imágenes sugerentes. Si intentas explicar los fenómenos subatómicos, la única manera de encontrar imágenes sugerentes es recurriendo a una analogía. Esto es lo que se me ocurrió: imagine pequeños robots pululando por el suelo de una cámara de vacío. Cada robot está dotado de una vela, y las hay de todos los tamaños, desde muy grandes a muy pequeñas. Primero grabamos a los robots cuando se ha hecho el vacío en la cámara: todos se mueven a la misma velocidad, pues en esa situación las velas son completamente irrelevantes, ya que no hay aire que puedan sentir. Pero a continuación dejamos que la atmósfera penetre en la cámara y los volvemos a filmar en movimiento. Ahora los robots con velas diminutas siguen moviéndose muy rápido, mientras que los que las tienen muy grandes se desplazan mucho más lentamente. Espero que la analogía quede clara: los robots son las partículas, y las velas son sus acoplamientos con el campo de Higgs, representado por el aire. En el vacío, cuando no hay aire, los robots son todos simétricos y se mueven a la misma velocidad. Al llenar la cámara de aire se rompe la simetría, igual que la rompe el Higgs. Se podría incluso trazar una analogía entre las ondas sonoras en el aire y la partícula de Higgs.

Puesto que soy una persona con inclinaciones teóricas, nadie quería que me hiciese cargo de los robots, así que pedí consejo a varios colegas de los departamentos de ingeniería y aeronáutica del Caltech. Cuando les expliqué lo que quería hacer, la respuesta fue unánime: «No tengo ni idea de lo que es el bosón de Higgs, o de si la analogía es buena, pero parece algo asombroso».

En esencia, la ciencia es la búsqueda de lo asombroso, ese asombro literal que

uno siente cuando entiende algo profundo por primera vez. Es un sentimiento con el que todos nacemos, aunque con frecuencia se pierde a medida que nos hacemos mayores y otras preocupaciones más mundanas ocupan nuestras vidas. Cuando se produce un gran acontecimiento, como el descubrimiento del bosón de Higgs en el LHC, esa curiosidad infantil que aún pervive en nuestro interior resurge de nuevo. Fueron necesarias miles de personas para construir el LHC y sus experimentos, y para analizar los datos que llevaron al descubrimiento, pero ese logro le pertenece a cualquiera que sienta interés por el universo.

Muhammad Yahia escribe el blog House of Wisdom para la revista *Nature*, dedicado a la ciencia en Oriente Próximo. Después de los seminarios del 4 de julio en los que se anunció el descubrimiento del Higgs, celebró así la universalidad del impulso científico:

En un momento en que los pueblos de distintos lugares del mundo árabe tienen que hacer frente a sus propios problemas políticos, revoluciones y asuntos relacionados con los derechos humanos, la ciencia nos habla a todos por igual y nos convertimos en uno solo. Las únicas dos actividades humanas que trascienden las fronteras a esta escala tan enorme son el arte y la ciencia.

El 4 de julio de 2012, apenas horas después de los seminarios que anunciaron el descubrimiento del bosón de Higgs a un mundo expectante, le preguntaron a Lyn Evans qué es lo que esperaba que los jóvenes sacasen en claro de la noticia. Su respuesta fue inmediata: «Inspiración. Estos proyectos insignia deben ser fuente de inspiración. Cuando éramos jóvenes estaban pasando muchas cosas, como la llegada del hombre a la Luna. Hacer que la gente joven se ilusione con la ciencia es esencial». Y podemos decir que lo han conseguido.

SIGNIFICADO Y VERDAD

Los orígenes de la física de partículas se remontan a los atomistas griegos y romanos de la Antigüedad. Filósofos como Leucipo, Demócrito, Epicuro y

Lucrecio desarrollaron una comprensión del mundo natural basada en la idea de que la materia y la energía representaban diversas ordenaciones de un número reducido de átomos fundamentales. No eran científicos en el sentido moderno de la palabra, pero algunas de sus ideas encajan bastante bien con nuestra manera actual de pensar sobre el universo.

En el mundo antiguo no existía la estricta separación que hemos erigido entre las distintas disciplinas académicas en la universidad contemporánea, de manera que, como filósofos, estaban tan interesados por la ética y el significado de la vida como por la realidad material. Como sucede con su idea de los átomos, no todas sus conclusiones siguen vigentes actualmente, pero muchas de sus ideas continúan siendo relevantes. Trataron de desarrollar las consecuencias lógicas de su visión de un mundo formado por átomos. Si la realidad es simplemente la interacción entre átomos, ¿dónde encontraremos propósito y significado? Epicuro, en particular, respondió a este problema señalando que el valor radica en la vida tal y como la vivimos en la Tierra, y animando a sus seguidores a enfrentarse a la muerte con serenidad, a valorar la amistad y a buscar el placer en la moderación.

La ciencia es en última instancia una empresa descriptiva, no prescriptiva. Nos dice qué es lo que sucede en el mundo, no lo que debería suceder ni cómo hemos de juzgar lo que sucede. Conocer la masa del bosón de Higgs no hace que seamos mejores personas, ni nos ayuda a decidir qué organización humanitaria merece nuestro apoyo. Sin embargo, la práctica de la ciencia ofrece varias lecciones fundamentales para la manera en que vivimos nuestras vidas.

La primera lección es que todos formamos parte del universo. Todos los elementos que componen el cuerpo humano se describen satisfactoriamente a través del Modelo Estándar de la física de partículas. Los elementos más pesados, que tan fundamentales son para nuestra bioquímica, se formaron por fusión nuclear en el interior de las estrellas, de ahí el famoso dicho de Carl Sagan: «Somos polvo de estrellas». Saber que nuestros átomos se rigen por el Modelo Estándar no es muy útil cuando de lo que se trata es de resolver los

problemas de nuestra vida cotidiana relacionados con la política, la psicología, la economía o las relaciones sentimentales. Pero cualquier idea que tengamos en ese sentido debería al menos ajustarse a lo que sabemos sobre el comportamiento de las partículas elementales.

Somos una parte del universo que ha desarrollado una notable capacidad: podemos construirnos una imagen del mundo en nuestra mente. Somos materia que se contempla a sí misma. ¿Cómo es eso posible? La física de partículas no nos da la respuesta, pero es un ingrediente básico en una historia más amplia de la que dicha respuesta emerge. Con el descubrimiento del bosón de Higgs, nuestra comprensión de la física que subyace en nuestra realidad cotidiana es completa. Hay mucho sitio para nuevas partículas y fuerzas, pero solo para aquellas cuya interacción con la materia ordinaria es tan débil o tan breve que no podemos percibir las sin construir aparatos de miles de millones de dólares. Este es un logro sobresaliente en la historia intelectual de la humanidad.

La otra lección de la ciencia es que la naturaleza no permite que nos engañemos a nosotros mismos. La ciencia procede planteando suposiciones, que dignifica llamándolas «hipótesis», y comprobándolas después con los datos. El proceso puede tardar décadas o incluso más —y determinar qué se entiende por «la mejor explicación de los datos» es un problema especialmente complicado—, pero, a fin de cuentas, los experimentos tienen la última palabra. No importa lo bella que sea tu idea, cuántos premios hayas ganado o cuál sea tu cociente intelectual: si tu teoría contradice los datos, es errónea.

Esta es una de esas situaciones en las que hay una noticia buena y una mala. La mala es que la ciencia es difícil. La naturaleza es implacable, y la mayoría de las teorías que podríamos proponer (y, de hecho, la mayoría de las que se proponen) resultarán ser incorrectas. Pero la buena noticia es que la naturaleza, esa severa tirana, nos guía progresivamente hacia ideas que nunca habríamos podido inventar armados únicamente de nuestra capacidad mental. Parafraseando a Sidney Coleman, mil filósofos que se pasasen mil años pensando nunca habrían inventado nada tan extraño como la mecánica cuántica.

Solo somos capaces de crear las estructuras profundamente contrarias a nuestra intuición que constituyen la base de la física moderna porque los datos nos cierran cualquier otra vía de escape.

Imagine que una persona de la Antigüedad se preguntase qué es lo que hace que el Sol brille. No es verosímil imaginar que, tras reflexionar sobre ello durante un rato, concluyese: «Seguro que el Sol está compuesto por partículas que pueden chocar entre sí y unirse, y que una de ellas se transforma en otra de un tipo distinto emitiendo una tercera partícula, que carecería de masa de no ser por la existencia de un campo que ocupa todo el espacio y rompe la simetría responsable de la fuerza asociada, y que la fusión de las dos partículas originales libera energía, que es en última instancia lo que vemos como luz solar». Pero eso es exactamente lo que sucede. Hemos tardado muchas décadas en encajar las distintas piezas de esta historia, y nunca lo habríamos hecho si, a cada paso que dábamos, no nos hubiesen obligado a ello las exigencias de la observación y los experimentos.

La parte positiva es que, una vez que los datos nos orientan sobre cuál es el camino a seguir, la ciencia es capaz de dar extraordinarios saltos hacia el futuro. En los años sesenta, los físicos construyeron una teoría unificada de las interacciones electromagnética y débil, basada en algunos principios generales que los experimentos previos habían dado por buenos y en determinados hechos procedentes de la observación, tales como la ausencia de bosones sin masa que transmitiesen la fuerza débil. De esa teoría surgió una predicción: debería existir una nueva partícula con masa, el bosón de Higgs, que se acople con las partículas conocidas de determinadas maneras concretas. En 2012, cuarenta y cinco años después de que el artículo de Steven Weinberg del año 1967 combinase todos los elementos de la teoría, esa predicción se hizo realidad. El intelecto humano, guiado por las pistas que deja la naturaleza, fue capaz de dilucidar una verdad profunda sobre el funcionamiento del universo. Y, basándonos en esa idea, esperamos ver todavía más allá en los años venideros.

Cuando hablé con JoAnne Hewett sobre qué es lo que necesita un físico para

tener éxito, hubo una palabra que se repitió una y otra vez: «perseverancia». Un científico necesita tener perseverancia para no abandonar cuando deba enfrentarse a problemas difíciles, y la sociedad en su conjunto necesita estar dispuesta a apoyar proyectos costosos y de larga duración para hacer frente a las cuestiones más difíciles. Cuando de lo que se trata es de comprender la arquitectura de la realidad, la parte fácil hace tiempo que ha quedado atrás.

Las cuestiones a las que nos enfrentamos son difíciles, pero, si la historia reciente nos puede servir de guía, con mucha determinación y algún que otro destello de genio nos debería bastar para resolverlas. Puede que hayamos completado la construcción del Modelo Estándar, pero aún tenemos por delante la tarea de incorporar el resto de la realidad a la comprensión humana. Si no fuese difícil no sería tan divertido.

Apéndice 1

Masa y espín

Lo primero que he dicho sobre el campo de Higgs es que proporciona masa a otras partículas. En este apéndice voy a explicar lo que eso significa con algo más de detalle. Nada de lo que aquí se cuenta es absolutamente necesario, pero puede que ayude a aclarar un par de cosas.

Entonces, ¿por qué necesitamos un campo cuya función es la de dar masa a otras partículas? ¿Por qué no pueden las partículas tener masa sin ninguna ayuda?

Podemos imaginar perfectamente la existencia de partículas con masa sin la intervención del campo de Higgs. Pero las partículas del Modelo Estándar son un tipo especial que no permite que eso suceda. Hay dos conjuntos distintos de partículas que adquieren su masa del campo de Higgs: los bosones W y Z que transmiten la fuerza de las interacciones débiles, y los fermiones con carga eléctrica (el electrón, el muón, el tau y todos los quarks). La manera en que los bosones adquieren masa se diferencia en algunos aspectos de la forma en que la obtienen los fermiones, pero la consigna fundamental es la misma en ambos casos: existe una simetría que aparentemente prohíbe cualquier masa, pero el campo de Higgs rompe dicha simetría. Para entender cómo sucede, hay que hablar del espín de las partículas elementales, algo que he estado evitando hasta este momento.

El espín es una de las características definitorias fundamentales de un partícula en la mecánica cuántica. La propia expresión «mecánica cuántica», aunque no es la terminología más precisa que se ha inventado jamás, procede del hecho de que ciertas cosas solo aparecen en paquetes discretos, no toman cualquier valor posible. Por ejemplo, la energía de un electrón que está ligado a

un núcleo atómico solo puede tomar determinados valores. Lo mismo sucede con una magnitud conocida como «momento angular», que permite caracterizar lo rápido que un objeto rota sobre sí mismo o alrededor de otro objeto. Las reglas de la mecánica cuántica nos dicen que el momento angular está cuantizado: solo puede tomar múltiplos fijos de un valor fundamental. La unidad mínima de momento angular viene dada por la constante de Planck, h , una magnitud fundamental de la naturaleza, dividida por dos pi. Esta cantidad es tan importante que tiene su propia ortografía particular: se llama \hbar , que se pronuncia «hache barra». Planck inventó la constante h original en los primeros días de la mecánica cuántica, pero resulta que \hbar es mucho más útil, así que a menudo nos referimos a ella como «la constante de Planck». Numéricamente, \hbar es aproximadamente igual a $6,58 \times 10^{-16}$, en unidades de electronvoltios multiplicados por segundos.

Imagine que tenemos una peonza que está dando vueltas y que podemos manipular con mucha precisión. Hacemos que gire cada vez más despacio y observamos su movimiento con todo detalle. Lo que vemos es que, a medida que el giro se ralentiza, la peonza solo puede tomar determinadas velocidades de rotación, pero no otras: la rotación de la peonza puede pasar de pronto de una velocidad a otra, como el segundero de un reloj salta de un segundo al siguiente. En un momento dado, llegamos a la velocidad de rotación más baja posible, cuando el momento angular de la peonza es igual a \hbar . La razón por la que no nos damos cuenta de este fenómeno cuando vemos a los patinadores olímpicos dar vueltas sobre el hielo es que esa mínima velocidad de rotación es muy lenta: una peonza de juguete con momento angular de \hbar tardaría cien billones de veces la edad del universo en dar una vuelta completa.

La rotación de una peonza posee momento angular porque los átomos que la componen giran alrededor de un eje central. Una de las consecuencias de la mecánica cuántica es que las partículas individuales también pueden tener «espín», aunque en realidad no giren alrededor de ninguna cosa. Lo sabemos porque el momento angular total permanece constante a lo largo del tiempo, y

observamos procesos en los que partículas que antes de interactuar están orbitando dejan de hacerlo como consecuencia de la interacción. En ese caso, debemos concluir que el momento angular ha pasado al espín de la partícula. Cuando hablemos de «espín», siempre nos referiremos a esta rotación intrínsecamente mecanocuántica de las partículas elementales, y utilizaremos «momento angular» para hablar del fenómeno clásico en el que un objeto se mueve alrededor de otro (también conocido como momento angular «orbital»).

CÓMO FUNCIONA EL ESPÍN

Hay varios hechos fundamentales que hay que saber sobre el espín. Cada tipo de partícula posee una cantidad fija y constante de espín: nunca rotarán más rápido ni más despacio. Medido en unidades de \hbar , cada fotón del universo tiene un espín igual a uno, mientras que el de cada bosón de Higgs es igual a cero. El espín es una característica intrínseca de la partícula, no es algo que varíe con la evolución de la misma (a menos que se transforme en otro tipo de partícula).

A diferencia del momento orbital angular normal, la unidad mínima de espín es medio \hbar , en lugar de un \hbar entero. Un electrón posee un espín de un medio, igual que un quark up. La razón por la que esto es así es una de esas curiosas rarezas de la teoría cuántica de campos, pero para profundizar en ello tendría que entrar en más detalles que en el resto de este apéndice, ya relativamente técnico de por sí.

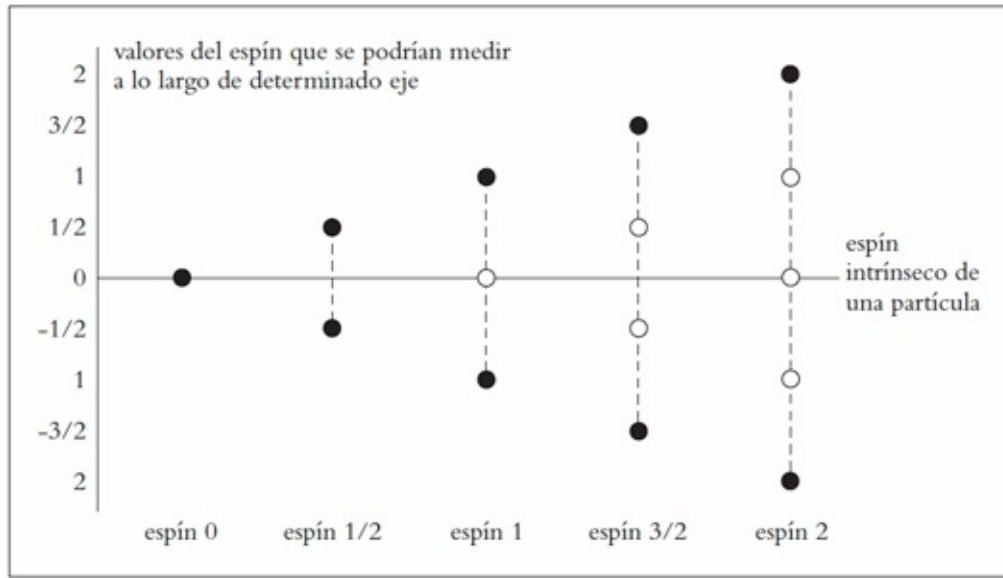
Existe una correlación sencilla entre el espín de una partícula y su naturaleza de fermión o bosón. Todos los bosones poseen un espín cuyo valor es un número entero: 0, 1, 2, etc. (en unidades de \hbar , que serán las que utilizemos de aquí en adelante). Todo fermión posee un espín igual a un entero más un medio: 1/2, 3/2, 5/2, etc. Esta conexión es tan estrecha que mucha gente define los bosones como «partículas con espín entero» y los fermiones como «partículas con espín semientero». Pero eso no es exactamente correcto: la definición que he dado,

según la cual los bosones se pueden amontonar unos encima de otros, mientras que los fermiones ocupan espacio, es la verdadera distinción entre estas dos clases de partículas. Un famoso teorema de la física, el «teorema de la estadística del espín», nos dice que las partículas que pueden apilarse unas encima de otras deben tener espín entero, mientras que las que ocupan espacio han de tenerlo semientero; al menos en el espacio-tiempo cuatridimensional, que es el que nos interesa aquí.

Las partículas del Modelo Estándar poseen espines muy definidos. Todos los fermiones conocidos —quarks, leptones con carga y neutrinos— tienen espín $1/2$. El gravitino, el hipotético compañero supersimétrico del gravitón, tendría espín $3/2$, pero nunca se ha observado ninguno. El propio gravitón posee espín 2 , algo único entre las partículas elementales. Los otros bosones de gauge —el fotón, los gluones, los W y el Z— todos tienen espín 1 . (La diferencia entre el gravitón y los demás bosones transmisores de fuerzas se debe en última instancia al hecho de que la simetría básica de la gravedad es una simetría del propio espacio-tiempo, mientras que las otras fuerzas se propagan sobre el espacio-tiempo.) El bosón de Higgs, a diferencia de todas las demás partículas, posee espín cero. Las partículas con espín cero se denominan «escalares», y los campos de los que surgen son «campos escalares».

Es importante distinguir entre el «espín de una partícula» y el «valor del espín que medimos con respecto a determinado eje». Supongamos que el momento angular de la Tierra en su rotación sobre su eje, que va del Polo Sur al Polo Norte, es un cierto número (grande). Decimos entonces que podríamos imaginar que medimos el momento angular con respecto a un eje que apunte en la dirección contraria, de norte a sur. Y el resultado sería el opuesto del valor original. El momento angular no ha variado, simplemente lo hemos medido con respecto a un eje diferente. Si observamos el eje original desde arriba, un espín positivo significa que veremos que el objeto gira en la dirección contraria a las agujas del reloj, mientras que un espín negativo implica que lo hace en el sentido de las agujas del reloj. Para quien la observa verticalmente desde el Polo Norte,

la Tierra rota en sentido contrario a las agujas del reloj, de manera que tiene espín positivo. (Esto se conoce como la «regla de la mano derecha»: si encoges los dedos de tu mano derecha en la dirección en que un objeto rota, el pulgar indica el eje según el cual el espín es positivo.)



Resultados permitidos al medir el espín intrínseco de una partícula con respecto a un eje. Si la partícula no tiene masa, solo son posibles los resultados de los círculos rellenos, mientras que si las partículas poseen masa, el espín puede tomar los valores tanto de los círculos rellenos como de los vacíos.

Incluso podemos plantearnos medir el momento angular con respecto a un eje completamente perpendicular (por ejemplo, uno que atraviese el ecuador de lado a lado). Con respecto a esa dirección, la Tierra no rota en absoluto: los polos Norte y Sur permanecen en la misma posición con respecto a un eje imaginario que atraviese el ecuador. Por lo tanto, diríamos que el espín medido con respecto a ese eje es cero.

Igual que el espín total de una partícula está cuantizado, y solo puede tomar valores de múltiplos enteros o semienteros de \hbar , el espín que podemos medir también lo está. Debe ser o bien igual al espín total, o al espín total cambiado de

signo, o a algún número entre ambos, siempre que la diferencia entre ellos sea un número entero. Para una partícula de espín cero, el único resultado posible que podemos obtener al medir su espín es cero. Para una partícula de espín $1/2$, podemos obtener $+1/2$ o $-1/2$ (eso es todo, no podríamos obtener otros dos valores cualesquiera aunque estuviesen separados por una unidad). Para una partícula de espín 1, podríamos obtener $+1$, -1 o 0 . Si medimos 0 , eso significa que la partícula no está rotando, sino simplemente que lo hace a lo largo de un eje perpendicular al que hemos utilizado para hacer la medición. Ninguna medición nos dará nunca como resultado $7/13$, o la raíz cuadrada de dos, o ninguna locura por el estilo. La mecánica cuántica no lo permite.

GRADOS DE LIBERTAD

En este punto tenemos que trazar una distinción entre las partículas que poseen masa y las que no la tienen. (¿Ve ahora el lector la relación con el campo de Higgs?) Resulta que, cuando se mide el espín de una partícula sin masa, solo se pueden dar dos resultados: su espín intrínseco con signo positivo o con signo negativo. (Para las partículas de espín cero ambos coinciden, por lo que solo hay un resultado posible.) Dicho de otro modo, independientemente del eje que elijamos, cuando medimos el espín de una partícula sin masa de espín 1, como el fotón, a lo largo de dicho eje, obtendremos $+1$ o -1 , pero nunca cero. Para partículas con espín cero o espín $1/2$, esto da igual, porque no se pierde ningún valor, pero, para partículas con espines mayores, es muy importante. Cuando medimos el espín de un fotón o un gravitón, solo podemos obtener dos valores, pero cuando medimos el de un bosón W o Z , los valores posibles son tres, porque podríamos obtener cero. En la figura, los círculos rellenos representan los resultados que podemos obtener cuando medimos el espín de una partícula sin masa, mientras que para una partícula con masa podríamos obtener tanto los valores de los círculos rellenos como los de los vacíos.

El motivo por el que este hecho es tan importante es que cada uno de los valores del espín permitidos representa un nuevo «grado de libertad», que es la manera que tienen los físicos de decir «algo que puede suceder independientemente de que sucedan otras cosas». Puesto que de lo que se está hablando aquí en realidad es de campos cuánticos, cada grado de libertad representa una determinada manera en que el campo puede vibrar. Un campo de espín cero, como el de Higgs, solo tiene una manera posible de vibrar. Un campo de espín 1/2, como el del electrón, puede tener dos tipos de vibraciones, que se corresponden con el giro en el sentido de las agujas del reloj y en el sentido contrario alrededor de un eje cualquiera. (Es algo difícil de visualizar, lo reconozco.) Una partícula sin masa de espín 1, como el fotón, también tiene solo dos tipos de vibraciones. Pero una partícula con masa de espín 1, como el bosón Z, tiene tres tipos de vibraciones: con respecto a determinado eje, puede girar en el sentido de las agujas del reloj, en sentido contrario, o no girar en absoluto.

Puede parecer algo confuso, pero si repasamos la discusión del mecanismo de Higgs del capítulo 11 vemos que ayuda a entender lo que sucede cuando se rompe espontáneamente una simetría local. Recuerde que en el Modelo Estándar hemos empezado (antes de la ruptura de simetría) con tres bosones de gauge sin masa y cuatro bosones de Higgs escalares. Contemos el número de grados de libertad: dos por cada uno de los tres bosones de gauge sin masa, más uno por cada uno de los cuatro escalares, lo que da un total de $2 \times 3 + 4 = 10$. Tras la ruptura de simetría, tres de los escalares son engullidos por los bosones de gauge, que adquieren masa, dejando un único escalar con masa que observamos como el bosón de Higgs. Ahora contemos de nuevo los grados de libertad: tres por cada uno de los tres bosones de gauge con masa, más uno por el bosón escalar restante, para un total de $3 \times 3 + 1 = 10$. Coinciden. La ruptura espontánea de simetría no crea ni destruye grados de libertad, simplemente los mezcla.

Contar grados de libertad ayuda a explicar por qué los bosones de gauge carecen de masa sin el Higgs. Para empezar, los bosones de gauge existen

porque hay una simetría local —una simetría que opera por separado en cada punto del espacio— y necesitamos definir campos de conexión que relacionen las operaciones de simetría en distintos puntos. Resulta que se necesitan exactamente dos grados de libertad para definir este tipo de campo. (Créame. Es difícil encontrar una manera razonable de explicarlo sin profundizar en las matemáticas.) Cuando tenemos una partícula de espín 1 o 2 con solo dos grados de libertad, inevitablemente esa partícula carece de masa. El campo de Higgs es un grado de libertad completamente separado; cuando los bosones de gauge lo engullen, adquieren masa. Si no hubiese grados de libertad adicionales disponibles, los bosones de gauge no habrían podido adquirir masa, como sucede con las demás fuerzas conocidas.

Con suerte, esto ayudará a explicar por qué los físicos tenían tanta confianza en que algo como el Higgs debía existir, incluso antes de que se hubiese descubierto. En cierto sentido, ya se había descubierto: tres de los cuatro bosones escalares ya estaban ahí, como las partes de espín cero de los bosones con masa W y Z. Lo único que faltaba era encontrar el cuarto.

POR QUÉ LOS FERMIONES CARECEN DE MASA SIN EL HIGGS

He aquí la razón por la que el hecho de que los fermiones tengan masa requiere una explicación. Fíjese en que el argumento de los grados de libertad que hemos utilizado para los bosones de gauge no es relevante en este caso: un fermión de espín 1/2 tiene dos valores posibles del espín, con independencia de que tenga masa o no.

Pensemos primero en una partícula con masa de espín 1/2, como el electrón. Imaginemos que se aleja directamente de nosotros, y medimos que su espín, a lo largo de un eje que apunta en la dirección de su movimiento, es de +1/2. Pero podemos imaginar que aceleramos hasta empezar a recortarle distancia al electrón; es decir, nos estamos moviendo hacia él. No ha variado nada intrínseco

al electrón, incluido su espín, pero sí lo ha hecho su velocidad con respecto a nosotros. Definimos una magnitud llamada «helicidad» de una partícula, que es el espín medido a lo largo del eje definido por su movimiento. La helicidad pasa de ser $+1/2$ a $-1/2$, y lo único que hemos hecho ha sido alterar nuestro propio movimiento, no hemos tocado el electrón para nada. Claramente, la helicidad no es una propiedad intrínseca de la partícula, sino que depende de cómo la observemos.

Consideremos ahora un fermión sin masa de espín $1/2$ (como sería el electrón sin la ruptura espontánea de simetría). Supongamos que se aleja de nosotros y que medimos que su espín, a lo largo del eje definido por la dirección de su movimiento, es de $+1/2$, de manera que su helicidad es de $+1/2$. En este caso, el fermión se mueve necesariamente a la velocidad de la luz (porque eso es lo que hacen las partículas sin masa). Por tanto, no podemos alcanzarlo y alterar así la dirección de su movimiento aparente. Cualquier observador en el universo verá que la helicidad de esta partícula sin masa tiene un único valor. En otras palabras, para partículas sin masa, la helicidad es una magnitud bien definida, con independencia de quién la mida, a diferencia de lo que sucede con las partículas que tienen masa. Una partícula con helicidad positiva es «dextrógira» (gira en sentido contrario a las agujas del reloj cuando viene hacia nosotros), mientras que una partícula de helicidad negativa es «levógira» (cuando se aproxima a nosotros, gira en el sentido de las agujas del reloj).

Y el motivo por el que todo esto es importante es que las interacciones débiles se acoplan con los fermiones que poseen un tipo de helicidad, pero no con los otros. En particular, antes de que aparezca el bosón de Higgs y rompa la simetría, los bosones de gauge sin masa de las interacciones débiles se acoplan con los fermiones levógiros, pero no con los dextrógiros, y también con los antifermiones dextrógiros, pero no con los levógiros. No me pregunte por qué funciona así la naturaleza, lo único que sabemos es que es lo que necesitamos para que los datos cuadren. La fuerza fuerte, la gravedad y el electromagnetismo se acoplan por igual con las partículas levógiros y dextrógiros, pero la fuerza

débil no. Eso explica también por qué las interacciones débiles violan la paridad: cuando miramos al mundo a través de un espejo la izquierda y la derecha se intercambian.

El hecho de que una fuerza se acople con una helicidad pero no con la otra obviamente no tiene ningún sentido si la helicidad es distinta para observadores que se mueven a diferentes velocidades. O la fuerza débil se acopla a una partícula, o no lo hace. Si la fuerza débil se acopla únicamente a las partículas levógiras y a las antipartículas dextrógiras, debe ser cierto que dichas partículas poseen una helicidad definida y constante. Y eso solo puede suceder si se mueven a la velocidad de la luz. Lo cual, por último, significa que deben tener masa nula.

Si asumimos lo anterior, eso nos ayudará a entender en parte por qué he dado tantas vueltas en nuestro primer intento de definir el Modelo Estándar. He dicho que los fermiones conocidos aparecen en parejas, que serían simétricas si no fuese por la presencia del Higgs en el espacio vacío. Los quarks up y down forman una pareja, los electrones y los neutrinos electrónicos forman otra pareja, etcétera. Pero en realidad son solo quarks up y down levógiras los que forman una pareja simétrica; no existe una simetría local que conecte los quarks up y los quark down dextrógiras, y lo mismo sucede con el electrón y su neutrino. (En la versión original del Modelo Estándar, se pensaba que los neutrinos no tenían masa, y los neutrinos dextrógiras ni siquiera existían. Ahora sabemos que los neutrinos poseen una masa pequeña, pero la situación de los neutrinos dextrógiras sigue sin estar clara.) Una vez que el Higgs ocupa todo el espacio, la simetría débil se rompe y los quarks y leptones cargados que se observan poseen todos masa, y pueden tener helicidad dextrógira o levógira.

Ahora vemos por qué se necesita el bosón de Higgs para que los fermiones del Modelo Estándar tengan masa. Si la simetría de la interacción débil no estuviese rota, la helicidad sería una propiedad fija de cada fermión, lo que significaría que ninguno de ellos tendría masa y todos se moverían a la velocidad de la luz. Todo se debe a que las interacciones débiles distinguen entre izquierda y derecha. Si

eso no fuese así, no habría ningún obstáculo para que los fermiones tuviesen masa, tanto con el Higgs como sin él. De hecho, el propio Higgs es un campo escalar con masa. Pero no es que el Higgs se proporcione la masa a sí mismo, sino que simplemente la tiene, porque no hay ningún motivo por el que no hubiera de tenerla.

Apéndice 2

Las partículas del Modelo Estándar

A lo largo del libro he hablado de las diversas partículas del Modelo Estándar, pero no siempre de manera sistemática. Aquí ofrezco un resumen de las partículas y sus propiedades.

Hay dos tipos de partículas elementales: los fermiones y los bosones. Los fermiones ocupan espacio. Esto es, no se pueden poner dos fermiones idénticos uno encima de otro exactamente en la misma configuración. Forman por tanto la base de los objetos sólidos, de las estrellas de neutrones a las mesas. Los bosones se pueden apilar unos encima de otros tanto como se quiera. Son así capaces de crear campos de fuerza macroscópicos, como el electromagnético o el gravitatorio.

LOS FERMIONES

Empecemos por los fermiones. En el Modelo Estándar hay doce fermiones, clasificados siguiendo patrones bien definidos. Los fermiones sensibles a la fuerza nuclear fuerte son los quarks, y los que no lo son se llaman leptones. Hay seis tipos de quarks y seis tipos de leptones, organizados en tres pares, cada uno de los cuales constituye una generación. El espín de un fermión debe ser igual a un número semientero. Todos los fermiones elementales conocidos son partículas de espín $1/2$.

Existen tres quarks de tipo up, con carga eléctrica de $+2/3$ cada uno. En orden de masa creciente, son el quark up, el charm y el top. También existen tres quarks de tipo down, con carga de $-1/3$ cada uno: el quark down, el strange y el

bottom.

EL ZOO DE PARTÍCULAS: LOS FERMIONES			
Quarks (Sienten la fuerza fuerte; confinados en los hadrones)		Leptones (No sienten la fuerza fuerte; no están confinados)	
Quarks de tipo up (carga +2/3)	Quarks de tipo down (carga -1/3)	Leptones con carga (carga -1)	Neutrinos (carga 0)
Top (172 GeV)	Bottom (~4 GeV)	Tau (1,78 GeV)	Neutrino tauónico (pequeña)
Charm (~1 GeV)	Strange (~0,1 GeV)	Muón (0,106 GeV)	Neutrino muónico (pequeña)
Up (~0,002 GeV)	Down (~0,005 GeV)	Electrón (0,0005 GeV)	Neutrino electrónico (pequeña)

Los fermiones elementales, con sus cargas eléctricas y sus masas aproximadas. Las masas de los neutrinos aún no se han medido con precisión, pero todos ellos son más ligeros que el electrón. Las masas de los quarks también son aproximadas: es difícil medirlas, porque los quarks están confinados en el interior de los hadrones.

Cada tipo de quark puede existir en tres colores. Sería perfectamente legítimo contar cada color como un tipo distinto de partícula (en cuyo caso habría dieciocho tipos de quarks, no solo seis), pero puesto que los colores están todos relacionados entre sí por la simetría de las interacciones fuertes, que no está rota, normalmente no lo hacemos. Todas las partículas con color están confinadas en combinaciones sin color que llamamos «hadrones». Hay dos tipos sencillos de hadrones: los mesones, que están formados por un quark y un antiquark, y los bariones, que están compuestos por tres quarks, cada uno de ellos de un color distinto (rojo, verde y azul). Los protones (dos ups y un down) y los neutrones (dos downs y un up) son ambos bariones. Un ejemplo de mesón es el pión, del que existen tres variedades: una con carga positiva (up y antidown), una con

carga negativa (down y antiup) y una neutra (combinación de up-antiup y down-antidown).

A diferencia de los quarks, los leptones no están confinados: cada uno puede moverse independientemente por el espacio. Los seis leptones también se clasifican en tres generaciones, cada una de ellas con una partícula neutra y otra con carga -1 . Los leptones con carga son el electrón, el muón y el tau. Los leptones neutros son los neutrinos: el neutrino electrónico, el neutrino muónico y el neutrino tauónico. No entendemos muy bien las masas de los neutrinos, que no surgen de la misma manera que las del resto de los fermiones del Modelo Estándar, así que en este libro prácticamente las he ignorado. Sabemos que son pequeñas (menores de un electronvoltio), pero no nulas.

En realidad se pueden ver los doce fermiones como seis pares de partículas. Cada leptón con carga tiene su neutrino asociado, mientras que los quarks up y down forman otro par, igual que los charm y strange y los top y bottom. Como ejemplo de estos emparejamientos en la práctica, cuando un bosón W^- se desintegra en un electrón y un antineutrino, siempre es un antineutrino electrónico. De manera análoga, cuando un bosón W^- se desintegra en un muón, siempre lo hace acompañado de un antineutrino muónico, etcétera. (Me gustaría poder decir lo mismo de los quarks, pero lo cierto es que estos se combinan sutilmente entre sí.) Las partículas que forman cada pareja tendrían idénticas propiedades si no fuese por la escurridiza influencia del campo de Higgs. En el mundo que observamos, las partículas que componen cada par poseen distintas masas y cargas eléctricas, debido a que el Higgs oculta su naturaleza simétrica subyacente.

¿Es posible que los quarks y los leptones no sean realmente elementales, y que estén compuestos de partículas de un nivel aún más pequeño? Desde luego que es posible. Los físicos no tienen ningún interés particular en que las partículas actuales sean verdaderamente elementales. Les encantaría encontrar aún más misterios ocultos en su interior, y han dedicado bastante tiempo a inventar modelos en ese sentido y a comprobarlos experimentalmente. Las hipotéticas

partículas que compondrían los quarks y los leptones incluso tienen nombre: «preones». Lo que no tienen es ninguna evidencia experimental que los avale ni, de hecho, una teoría sugerente. El consenso actual es que parece que los quarks y los leptones son verdaderamente elementales, y no compuestos de algún otro tipo de partícula. Pero siempre nos podemos llevar una sorpresa.

LOS BOSONES

Pasemos ahora a los bosones, que siempre tienen espín con valor entero. El Modelo Estándar contempla cuatro tipos de bosones de gauge, cada uno de los cuales surge de una simetría local de la naturaleza y se corresponde con una determinada fuerza.

Los fotones, que transmiten la fuerza electromagnética, son partículas sin masa ni carga eléctrica y con espín 1. Los gluones, transmisores de la fuerza nuclear fuerte, también carecen de masa y de carga eléctrica, y poseen espín 1. Una diferencia importante entre ambos es que los gluones tienen color, por lo que están confinados en el interior de los hadrones, igual que los quarks. Debido a estos colores, en realidad existen ocho tipos distintos de gluones, pero como están relacionados mediante una simetría que no está rota, no nos preocupamos en ponerles etiquetas específicas.

Los gravitones, que transmiten la gravedad, carecen igualmente de masa y de carga eléctrica, pero tienen espín 2. Los propios gravitones interactúan con la gravedad —porque todas las partículas lo hacen—, pero en general la gravedad es tan débil que su influencia se puede omitir. (Las cosas cambian, desde luego, cuando se acumula una gran cantidad de masa, que produce un campo gravitatorio intenso.) De hecho, la debilidad de la gravedad significa que el gravitón es por lo general irrelevante para la física de partículas, al menos dentro del Modelo Estándar. Como no disponemos de una teoría completa de la gravedad cuántica, y puesto que es prácticamente imposible detectar los

gravitones individuales, hay mucha gente que no los incluye como partícula, aunque hay bastantes motivos para pensar que es real.

La fuerza débil la transmiten los bosones W, con carga, y el Z, neutro. Los tres poseen espín 1 y también tienen masa y, cuando se producen, se desintegran rápidamente. La ruptura de simetría debida al campo de Higgs es la responsable de que estos tres bosones adquieran masa y se diferencien entre sí. Si no fuese por el Higgs, los bosones W y Z serían más bien como los gluones, pero solo habría tres variedades en lugar de ocho.

EL ZOO DE PARTÍCULAS: LOS BOSONES				
	Nombre	Masa (GeV)	Carga	Espín
Electromagnetismo	fotón	0	0	1
Fuerza nuclear fuerte	gluones (8)	0	0	1
Fuerza nuclear débil	W ⁺ , W ⁻ , Z	80,4	+1, -1	1
		91,2	0	1
Gravedad	gravitón	0	0	2
Higgs	bosón de Higgs	125	0	0

Las partículas transmisoras de carga: los bosones. Las masas se miden en gigaelectronvoltios (GeV).

A diferencia de las tres fuerzas mencionadas previamente, la fuerza débil es tan tenue, que ni siquiera es capaz por sí sola de mantener dos partículas unidas. Cuando otras partículas interactúan a través de la fuerza débil, caben básicamente dos posibilidades: dos partículas pueden dispersarse mutuamente mediante el intercambio de un W o un Z, o un fermión con masa puede desintegrarse en otro fermión más ligero emitiendo un W, que a su vez se desintegra en otras partículas. Estos procesos desempeñan un rol fundamental en la búsqueda de nuevas partículas en el LHC.

El propio Higgs es un bosón escalar, lo que significa que su espín es cero. A diferencia de los bosones de gauge, no surge de una simetría, y no hay ninguna razón para suponer que su masa debería ser cero (o ni siquiera pequeña). Podemos hablar de una «fuerza» de Higgs, que incluso podría ser relevante para detectar materia oscura en los experimentos que se llevan a cabo a gran profundidad bajo tierra. Pero el gran interés que suscita el Higgs se debe al hecho de que el campo en el que se basa toma un valor distinto de cero en el espacio vacío, y su presencia influye en otras partículas al hacer que adquieran masa.

¿QUÉ PARTÍCULAS SON SENSIBLES A QUÉ FUERZAS?					
Partícula	Fuerza				
	Electromagnetismo	Fuerte	Débil	Gravedad	Higgs
quarks	X	X	X	X	X
leptones con carga	X		X	X	X
neutrinos			X	X	?
fotones				X	
gluones		X		X	
W ⁺ , W ⁻	X		X	X	X
Z			X	X	X
gravitón				X	
Higgs			X	X	X

Tabla que resume qué partículas (bosones y fermiones) interactúan con qué fuerzas. Los fotones transmiten la fuerza electromagnética, pero no interactúan directamente con ellos mismos, ya que son eléctricamente neutros. El origen de la masa del neutrino sigue siendo un misterio, por lo que se desconoce cómo interactúan con el Higgs.

Si el lector ha llegado hasta aquí, probablemente ya haya oído hablar bastante sobre el Higgs.

Apéndice 3

Las partículas y sus interacciones

Este apéndice, en el que hablaré sobre los diagramas de Feynman, también es más técnico que el texto principal del libro. Tiene permiso para saltárselo, o para mirar únicamente las imágenes. El propio Richard Feynman, cuando inventó los diagramas, pensó que sería muy divertido si algún día estos pequeños garabatos estuviesen por todas partes en las revistas científicas. Ese día ya ha llegado.

Los diagramas de Feynman son una manera sencilla de calcular lo que puede suceder cuando varias partículas elementales se aproximan e interactúan. Supongamos, por ejemplo, que queremos saber si un bosón de Higgs puede desintegrarse en dos fotones. Sabemos que los fotones no tienen masa, y que el Higgs interactúa únicamente con partículas con masa, por lo que en primera instancia cabría suponer que dicha desintegración no se produce. Pero, concatenando los diagramas de Feynman, podemos descubrir procesos mediante los cuales se puede conectar el bosón de Higgs con los fotones a través de partículas virtuales. Un físico iría más allá, y utilizaría los diagramas para calcular la probabilidad real de que tal evento se produzca: cada diagrama lleva asociado un número concreto, y sumando los distintos diagramas se obtiene el resultado final. No pretendemos ser físicos profesionales, pero aun así es útil ver qué aspecto tienen en forma de diagramas de Feynman las distintas interacciones permitidas. Estos diagramas llevan asociadas muchas reglas. Aquí solo se profundizará en ellos lo suficiente para hacernos una idea de qué es lo que sucede; si quiere más información, puede consultar un libro de texto de física de partículas o de teoría cuántica de campos.

He aquí algunos principios básicos: cada diagrama es una representación de varias partículas que interactúan entre sí y cambian de identidad, y el tiempo

transcurre de izquierda a derecha. Las partículas entrantes, que ocupan el extremo izquierdo del diagrama, y las salientes, que están en el extremo derecho, son partículas «reales» (tienen masas que figuran en las tablas del zoo de partículas del apéndice 2). Las partículas que existen únicamente en el interior del diagrama, que no se escapan de él por ninguno de los lados, son «virtuales» (su masa puede tomar cualquier valor). Es importante recalcarlo: las partículas virtuales no son partículas reales, sino simplemente instrumentos contables que indican cómo vibran los campos cuánticos durante la interacción entre partículas.

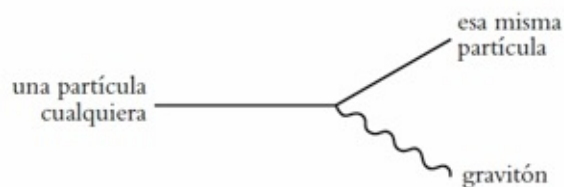
Representaré los fermiones con líneas continuas, los bosones de gauge mediante líneas onduladas y los bosones escalares (con el Higgs) con líneas de puntos. Las líneas de los fermiones nunca se acaban: o bien describen bucles cerrados o se extienden más allá del principio y/o fin del diagrama. Las líneas de los bosones, por su parte, pueden perfectamente tener un final, ya sea en líneas de fermiones o en otras líneas de bosones. El lugar donde se unen varias líneas se denomina «vértice». En cada vértice, la carga eléctrica se conserva. Así, si un electrón emite un bosón W para convertirse en un neutrino, sabemos que debe ser un W^- . El número total de quarks y el de leptones (en los que las antipartículas cuentan como -1) también se conserva en cada vértice. Podemos invertir temporalmente cualquier línea simplemente sustituyendo las partículas por sus antipartículas. Así, si un quark up puede convertirse en un down emitiendo un W^+ , un antidown puede transformarse en un antiup de la misma manera.

Comenzaré representando los diagramas básicos del Modelo Estándar. Los diagramas más complicados se pueden construir combinando estos bloques elementales de distintas maneras. No seré completamente exhaustivo, pero espero que sea suficiente para que quede claro el patrón básico.

Primero, veamos qué puede sucederle a un único fermión que aparece por la izquierda. Las líneas de los fermiones no pueden acabarse, de forma que algún tipo de fermión debe salir por el otro extremo. Pero podemos emitir un bosón.

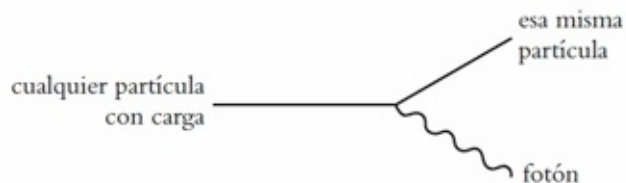
Básicamente, si un fermión siente una determinada fuerza, puede emitir el bosón que transmite dicha fuerza. He aquí varios ejemplos.

Todas las partículas son sensibles a la gravedad, por lo que todas ellas pueden emitir un gravitón (o absorberlo, si se invierte temporalmente el diagrama; como sucede con el fotón y con el Higgs, el gravitón es su propia antipartícula). Aunque aquí estoy dibujando una línea recta, como si la partícula fuese un fermión, también existen diagramas equivalentes para todos los bosones.



Fíjese en que este diagrama, y varios de los que veremos a continuación, describe una partícula que emite otra partícula pero permanece inalterada. Eso nunca puede suceder aisladamente, porque la energía no se conservaría. Todos los diagramas como este deben formar parte de algún diagrama más amplio.

A diferencia de lo que sucede con la gravedad, solo las partículas con carga son sensibles directamente al electromagnetismo. Un electrón puede emitir un fotón, pero un neutrino o un Higgs no. Lo pueden hacer de manera indirecta, a través de diagramas más complicados, pero no se pueden conseguir mediante ningún vértice sencillo.

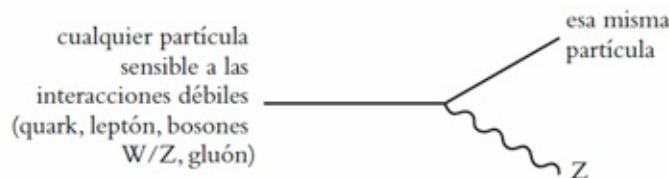


Análogamente, cualquier partícula sensible a las interacciones fuertes (quarks

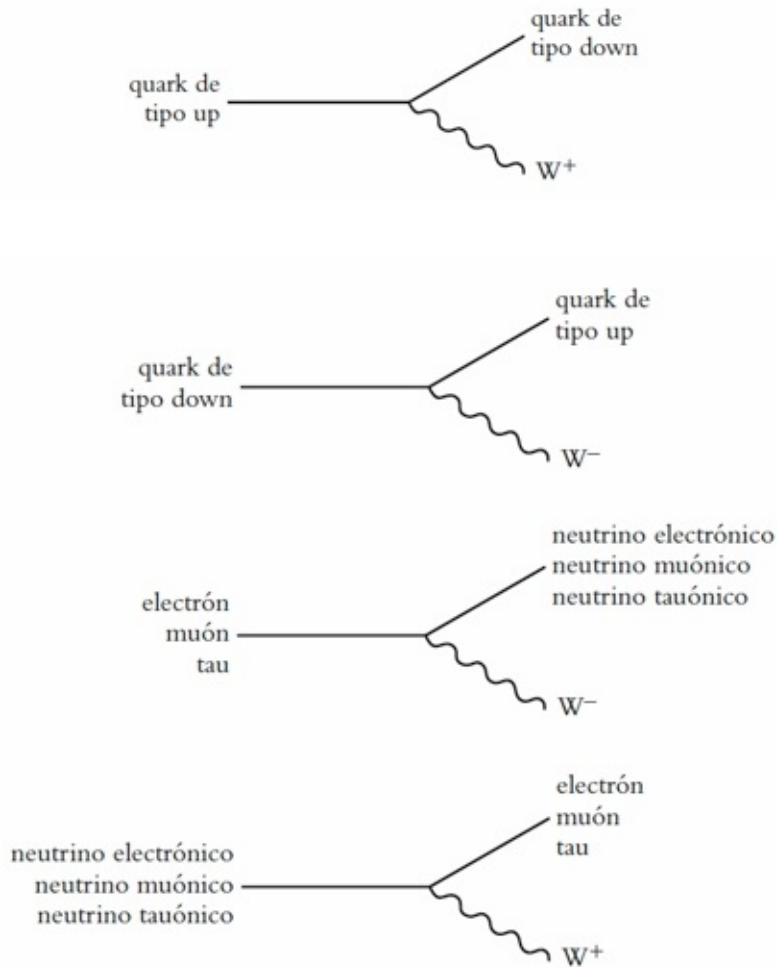
y gluones) puede emitir gluones. Observemos que los propios gluones interactúan a través de la fuerza nuclear fuerte, mientras que los fotones no poseen carga eléctrica: existe un vértice con tres gluones, pero no hay uno con tres fotones.



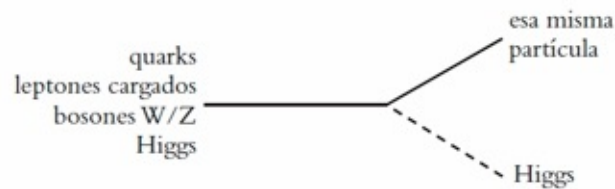
Ahora vienen las interacciones débiles, donde las cosas son un poco más complicadas. El bosón Z es bastante sencillo: cualquier partícula sensible a las interacciones débiles puede emitir y continuar su camino tranquilamente. (De nuevo, como parte de un diagrama más amplio.)



Una vez que llegamos a los bosones W, las cosas se complican un poco. A diferencia de los otros bosones que hemos comentado, los W poseen carga eléctrica. Eso significa que no se pueden emitir sin alterar la identidad de la partícula que los emite, pues de lo contrario la carga eléctrica no se conservaría. De manera que los bosones W sirven para realizar la transformación entre los quarks de tipo up (up, charm, top) en los de tipo down (down, strange, bottom), así como entre los leptones cargados (electrón, muón, tau) y sus neutrinos correspondientes.





El bosón de Higgs es muy parecido al Z: cualquier partícula sensible a la interacción débil puede emitirlo.





Ahora pasamos a los bosones entrantes. Pueden emitir otro bosón o dividirse en dos fermiones. Sin embargo, puesto que las líneas de los fermiones no pueden terminar, un bosón debe dividirse en un fermión y un antifermión. De esa


manera, el número total de fermiones al final es cero, igual que al principio. Existen múltiples ejemplos. Como puede observar, todos ellos están relacionados con diagramas que ya se han dibujado, a base de mover las líneas de un sitio a otro y alternar entre partículas y antipartículas donde sea apropiado. Como antes, si el bosón entrante no tiene masa, sabemos que solo puede utilizarse como componente de un diagrama más amplio, puesto que las partículas sin masa no pueden desintegrarse en otras con masa si se ha de conservar la energía. (Una manera de verlo es que la combinación de dos partículas con masa debe tener un «sistema de referencia en reposo» en el que el momento total es cero, mientras que para una única partícula sin masa no existe estado en reposo.)

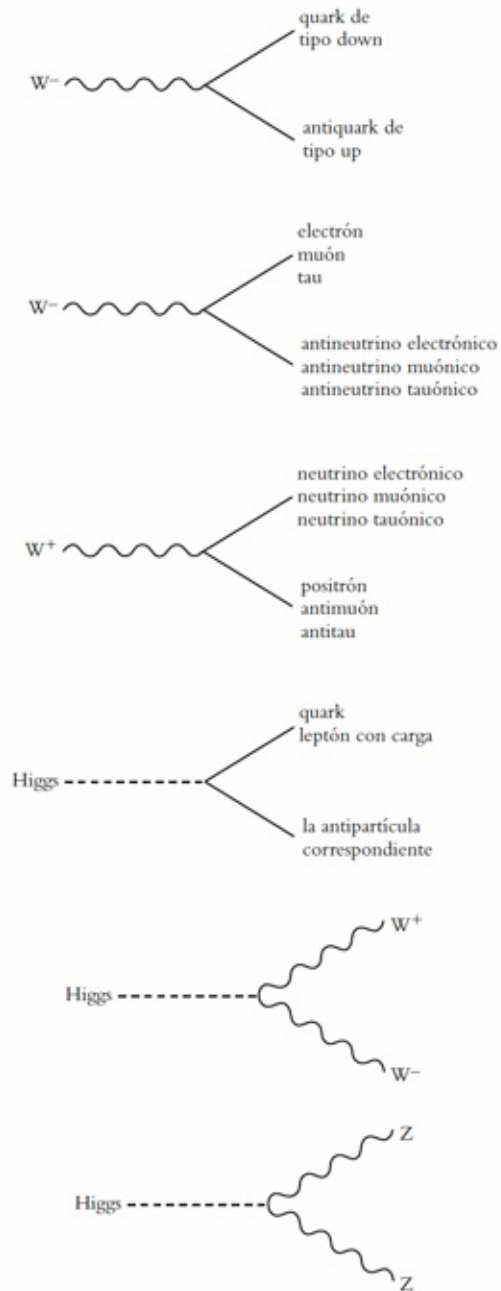
gravitón  una partícula cualquiera
la antipartícula correspondiente

fotón  una partícula con carga cualquiera
la antipartícula correspondiente

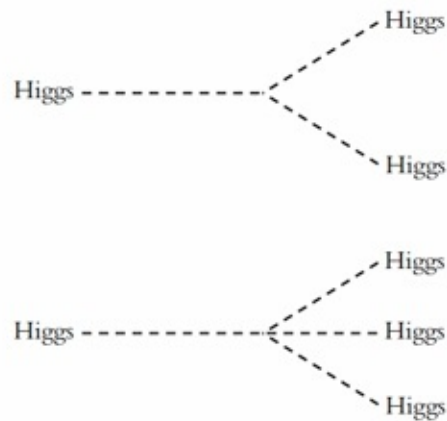
gluón  cualquier partícula sensible a la interacción fuerte (quark, gluón)
la antipartícula correspondiente

Z  quarks
leptones
bosones W/Z
fotones
Higgs
la antipartícula correspondiente

W⁺  quark de tipo up
antiquark de tipo down

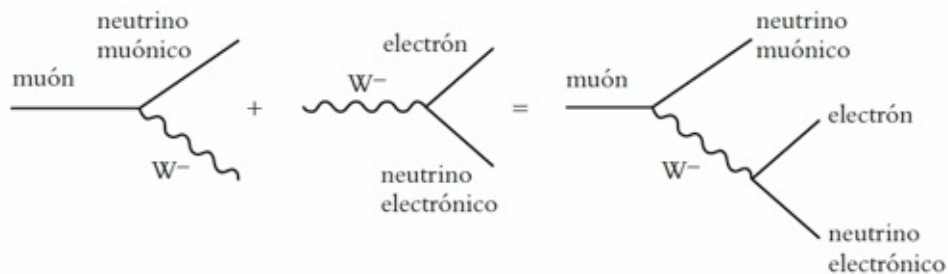


El único diagrama fundamental que nos queda por ver es el de la interacción del Higgs consigo mismo (puede dividirse en dos o tres copias). Claramente, esto violaría la conservación de la energía a menos que estuviese incorporado a un diagrama más amplio.

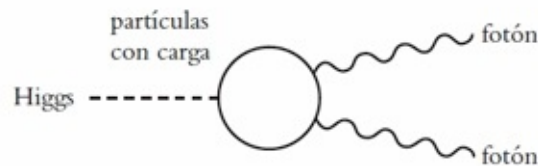


La diversión comienza realmente al combinar estos diagramas fundamentales para crear otros más grandes. Lo único que hay que hacer es unir las líneas que describen las partículas correspondientes: unir un electrón con un electrón, y así para el resto. Si partimos de los diagramas que hemos visto hasta ahora, puede que tengamos que alternar algunas líneas entre derecha e izquierda y convertir algunas partículas en sus antipartículas para que la cosa funcione.

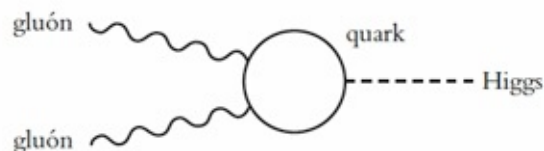
Por ejemplo, pongamos que queremos saber cómo puede desintegrarse un muón. Vemos que existe un diagrama en el que un muón emite un W^- y se convierte en un neutrino muónico. Pero eso no puede suceder de forma aislada, porque el W es más pesado que el muón. Ningún problema: todo va bien siempre que el W sea virtual y se desintegre en algo más ligero que el muón, como un electrón y su neutrino. Lo único que hemos de hacer es conectar las líneas del W^- de dos de los diagramas anteriores de una manera consistente.



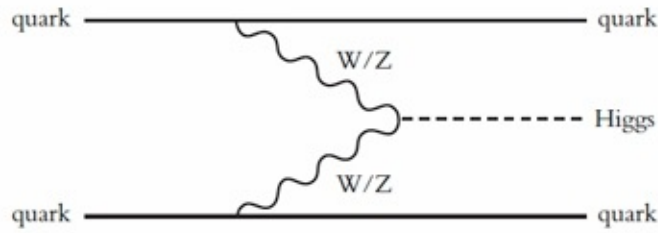
También podemos hacer que las líneas se cierren sobre sí mismas y formen bucles. El siguiente diagrama representa una contribución importante en la búsqueda del Higgs en el LHC: la desintegración del Higgs en dos fotones. El bucle de partículas virtuales en el medio podría contener cualquier partícula que se acople tanto con el Higgs (para que exista el vértice de la izquierda) como con los fotones (para que existan los de la derecha). Las partículas cuyo acoplamiento sea mayor serán las que más contribuyan. En este caso, será el quark top, que es la partícula de mayor masa del Modelo Estándar, y por lo tanto aquella que se acopla con mayor intensidad con el Higgs.



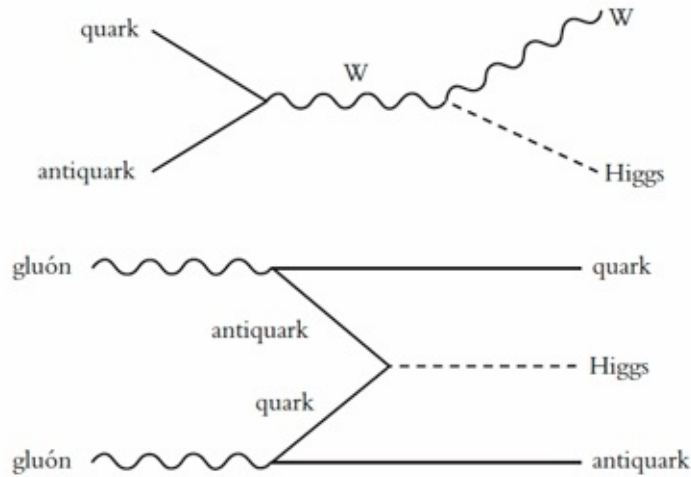
Finalmente, he aquí varias vías importantes en que se producen bosones de Higgs en el LHC antes de que se desintegren. Está la «fusión de gluones», en la que dos gluones se unen y producen un Higgs. Como los gluones no tienen masa, el proceso debe incluir una partícula virtual con masa que sea sensible a la interacción fuerte; es decir, un quark.



También está la «fusión de bosones vectoriales» (que hace referencia al hecho de que a los bosones W y Z a veces se les llama «bosones vectoriales»). Puesto que tienen masa, se pueden combinar directamente para producir un Higgs.



Por último, existen dos tipos distintos de «producción asociada», en la que junto al Higgs se produce alguna otra cosa: o bien un bosón W o Z, o un par quark-antiquark.



Con lo que hay que quedarse de todo esto no es tanto con los detalles de todos los distintos procesos que contribuyen a la producción y desintegración del Higgs como con la idea de que ambos procesos son complicados, que proceden de un conjunto de posibilidades diversas y que disponemos de reglas definidas que nos permiten calcular cuáles son. Resulta asombroso pensar que estas pequeñas viñetas captan una verdad tan profunda del comportamiento microscópico del mundo natural.

Lecturas adicionales

- Aczel, Amir, *Present at the Creation: The Story of CERN and the Large Hadron Collider*, Nueva York, Crown Publishers, 2010.
- CERN. CERN faq: LHC, the guide. <<http://cds.cern.ch/record/1165534>>, 2009.
- Close, Frank, *The Infinity Puzzle: Quantum Field Theory and the Hunt for an Orderly Universe*, Nueva York, Basic Books, 2011.
- Crease, Robert P., y Charles C. Mann, *The Second Creation: Makers of the Revolution in Twentieth Century Physics*, Nueva York, Collier Books, 1986.
- Halpern, Paul, *Collider: The Search for the World's Smallest Particles*, Hoboken, New Jersey, Wiley, 2009.
- Kane, Gordon, *The Particle Garden: The Universe as Understood by Particle Physicists*, Nueva York, Perseus Books, 1995.
- Lederman, Leon, con Dick Teresi, *The God Particle: If the Universe Is the Answer, What's the Question?*, Boston, Massachusetts, Houghton Mifflin, 2006 (hay trad. cast.: *La partícula divina*, Barcelona, Planeta, 2013).
- Lincoln, Don, *The Quantum Frontier: The Large Hadron Collider*, Baltimore, Maryland, Johns Hopkins University Press, 2009.
- Panek, Richard, *The 4 Percent Universe: Dark Matter, Dark Energy, and the Race to Discover the Rest of Reality*, Boston, Massachusetts, Mariner Books, 2011.
- Randall, Lisa, *Knocking on Heaven's Door: How Physics and Scientific Thinking Illuminate the Universe and the Modern World*, Nueva York, Ecco, 2011.
- Sample, Ian, *Massive: The Missing Particle That Sparked the Greatest Hunt in Science*, Nueva York, Basic Books, 2010.
- Taubes, Gary, *Nobel Dreams: Power, Deceit, and the Ultimate Experiment*, Nueva York, Random House, 1986.
- Traweek, Sharon, *Beamtimes and Lifetimes: The World of High Energy*

Physicists, Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press, 1988.

Weinberg, Steve, *Dreams of a Final Theory*, Nueva York, Vintage, 1992 (hay trad. cast.: *El sueño de una teoría final*, Barcelona, Crítica, 2010).

Wilczek, Frank, *The Lightness of Being: Mass, Ether, and the Unification of Forces*, Nueva York, Basic Books, 2008 (hay trad. cast.: *La ligereza del ser: masa, éter y la unificación de fuerzas*, Barcelona, Crítica, 2009).

Referencias

Las referencias se refieren a palabras clave dentro del texto principal. Con la única excepción del capítulo 11, «Sueños del Nobel», donde incluyo dos listas adicionales: una para las historias personales de las personas involucradas en los artículos de 1964 sobre la ruptura de simetría y otra que incluye todos los artículos técnicos mencionados en la discusión.

PRÓLOGO

Hewett: <<http://blogs.discovermagazine.com/cosmicvariance/2008/09/11/giddy-physicists/>>.

Evans: entrevista, 4 de julio de 2012.

Higgs: <<http://www.newscientist.com/article/dn22033-peter-higgs-boson-discovery-like-being-hit-by-a-wave.html?full=true>>.

1. LA IDEA

Faraday: <<http://bit.ly/ynX3dL>>.

Heuer: <<http://www.guardian.co.uk/science/2011/dec/13/higgs-boson-seminar-god-particle>>.

2. A VUELTAS CON LO DIVINO

Lederman y Teresi, *The God Particle*, p. xi.

Higgs: <<http://physicsworld.com/cws/article/indepth/2012/jun/28/peter-higgs-in-the-spotlight>>.

4. LA HISTORIA DEL ACELERADOR

Janot: V. Jamieson, «CERN Extends Search for Higgs», *Physics World*, octubre de 2000.

Watts: mensaje privado de correo electrónico, 4 de abril de 2012.

Hewett: entrevista, 23 de febrero de 2012.

Schwitters y Bloembergen: mencionado en Kelves, prefacio a la edición de 1995 de *The Physicists: The History of a Scientific Community in Modern America*.

Park: mencionado en Weinberg, *Dreams of a Final Theory*, p. 54.

Anderson: carta al editor, *The New York Times*, 21 de mayo de 1987.

Krumhansl: Sample, *Massive*, p. 115.

5. LA MÁQUINA MÁS GRANDE JAMÁS CONSTRUIDA

Evans, «carnicería»: entrevista, 4 de julio de 2012.

Baguette: <<http://www.telegraph.co.uk/science/large-hadron-collider/6514155/Large-Hadron-Collider-broken-by-bread-dropped-by-passing-bird.html>>.

Evans: <<http://www.elements-science.co.uk/2011/11/the-man-who-built-the-lhc/>>.

Evans: <<http://www.nature.com/news/2008/081217/full/456862a.html>>.

Giudice: *A Zeptospace Odyssey*, pp. 103-104.

Evans, fiesta de verano: entrevista, 4 de julio de 2012.

6. HACIA LA SABIDURÍA A BASE DE CHOQUES

Anderson: Eugene Cowan, «The Picture That Was Not Reversed», *Engineering and Science* 46, 6 (1982).

Comunicado de prensa del CERN: <<http://press.web.cern.ch/press/PressReleases/Releases2008/PR10.08E.html>>.

Computación por capas: Brumfield, <<http://www.nature.com/news/2011/110119/full/469282a.html>>.

Gianotti: entrevista, 3 de mayo de 2012.

Greek Security Team: Roger Highfield, <<http://www.telegraph.co.uk/science/large-hadron-collider/3351697/Hackers-infiltrate-Large-Hadron-Collider-systems-and-mock-IT-security.html>>.

8. A TRAVÉS DE UN ESPEJO ROTO

Yang y Pauli: Close, *The Infinity Puzzle*, p. 88.

9. EL MUNDO A SUS PIES

Telegraph: <<http://www.telegraph.co.uk/science/large-hadron-collider/8928575/Search-for-God-Particle-is-nearly-over-as-CERN-prepares-to-announce-findings.html>>.

viXra log: <<http://blog.vixra.org/2011/12/01/seminar-watch-higgs-special/>>.

Actualización del CERN:

<<http://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confId=150980>>.

Gianotti: <<http://www.youtube.com/watch?v=0K0oumH4dYA>>.

Gianotti, referencias al «espíritu» y al «oso»: entrevista, 15 de mayo de 2012.

Wu: <<http://physicsworld.com/cws/article/news/2011/dec/14/physicists-weigh-up-higgs-signals>>.

Ellis, Gaillard y Nanopoulos: *Nuclear Physics B* 106, 292 (1976).

Britton: <www.wired.co.uk/news/archive/2011-09/07/david-britton>.

Figura del ATLAS: <<http://www.atlas.ch/news/2012/latest-results-from-higgs-search.html>>.

Figura del CMS: <<http://hep.phys.sfu.ca/HiggsObservation/index.php>>.

Megatek: Taubes, *Nobel Dreams*, pp. 137-138.

Higgs: <<http://www.newscientist.com/article/dn22033-peter-higgs-boson-discovery-like-being-hit-by-a-wave.html?full=true>>.

Incandela: entrevista, 4 de julio de 2012.

10. DIFUNDIENDO EL MENSAJE

The Daily Show: <<http://www.thedailyshow.com/watch/thu-april-30-2009/large-hadron-collider>>.

The Daily Mail: <<http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-1052354/Are-going-to-die-Wednesday.html>>.

Tribunal de apelación: <http://cosmiclog.msnbc.msn.com/_news/2010/08/31/5014771-collider-case-finally-closed?lite>.

Dorigo: <http://www.science20.com/quantum_diaries_survivor/where_will_we_hear_about_higgs_first>.

Conway1: <<http://blogs.discovermagazine.com/cosmicvariance/2007/01/26/bump-hunting-part-1/>>.

Conway2: <<http://blogs.discovermagazine.com/cosmicvariance/2007/01/26/bump-huning-part-2/>>.

Conway3: <<http://blogs.discovermagazine.com/cosmicvariance/2007/03/09/bump-hunting-part-3/>>.

Cirelli y Strumia: <<http://arxiv.org/abs/0808.3867>>.

Picozza y Cirelli: <<http://www.nature.com/news/2008/080902/full/455007a.html>>.

Lykken: <<http://www.nytimes.com/2007/07/24/science/24ferm.html?pagewanted=all>>.

Woit: <<http://www.math.columbia.edu/~woit/wordpress/?p=3632&cpage=1#comment-88817>>.

Wu: correo electrónico, mayo 2012.

Gianotti: <http://www.nytimes.com/2012/06/20/science/new-data-on-higgs-boson-is-shrouded-in-secrecy-at-cern.html?_r=1&pagewanted=all>.

Schmitt: <<http://muon.wordpress.com/2012/06/17/do-you-like-to-spread-rumors>>.

Ouellette: <<http://news.discovery.com/space/rumor-has-it-120620.html>>.

«Large Hadron Rap»: <<http://www.youtube.com/watch?v=j50ZssEojtM>>.

Kaplan: entrevista, 20 de mayo de 2012.

Particle Fever: <<http://www.particlefever.com/index.html>>.

11. SUEÑOS DEL NOBEL

Freund: *A Passion for Discovery*, World Scientific (2007).

Anderson: P. W. Anderson, «More Is Different», *Science* 177, 393 (1972).

La mayor contribución de Anderson: correo electrónico, 2012.

Higgs sobre Anderson: P. Rodgers, «Peter Higgs: The Man Behind the Boson», *Physics World* 17, 10 (2004).

Lederman: *La partícula divina*.

Lykken: *Symmetry*, <<http://www.symmetrymagazine.org/article/march-2005/whats-in-a-name>>.

Bernardi: *Nature*, <<http://www.nature.com/news/2010/100804/full/news.2010.390.html>>.

Anderson sobre la historia: correo electrónico, 2012.

Recuerdos personales

P. W. Higgs, «Prehistory of the Higgs Boson», *Comptes Rendus Physique* 8, 970 (2007).

—, «My Life as a Boson», <<http://www.kcl.ac.uk/nms/depts/physics/news/events/MyLifeasaBoson.pdf>> (2010).

G. S. Guralnik, «The History of the Guralnik, Hagen, and Kibble Development of the Theory of Spontaneous Symmetry Breaking and Gauge Particles», *International Journal of Modern Physics A*24, 2601, arXiv:0907:3466 (2009).

T. W. B. Kibble, «The Englert-Brout-Higgs-Guralnik-Hagen-Kibble Mechanism (history)», *Scholarpedia*, <[http://www.scholarpedia.org/article/Englert-Brout-Higgs-Guralnik-Hagen-Kibble_mechanism_\(history\)](http://www.scholarpedia.org/article/Englert-Brout-Higgs-Guralnik-Hagen-Kibble_mechanism_(history))>.

R. Brout y F. Englert, «Spontaneous Symmetry Breaking in Gauge Theories: a Historical Survey», arXiv:hep-hp/9802142 (1998).

Artículos técnicos

V. L. Ginzburg y L. D. Landau, «On the Theory of Superconductivity», *Journal of Experimental and Theoretical Physics (URSS)* 20, 1064 (1950).

P. W. Anderson, «An Approximate Quantum Theory of the Antiferromagnetic Ground State», *Physical Review* 86, 694 (1952).

C. N. Yang y R. L. Mills, «Conservation of Isotopic Spin and Isotopic Gauge Invariance», *Physical Review* 96, 191 (1954).

L. N. Cooper, «Bound Electron Pairs in a Degenerate Fermi Gas», *Physical Review* 104, 1189 (1956).

- J. Bardeen, L. N. Cooper y J. R. Schrieffer, «Microscopic Theory of Superconductivity», *Physical Review* 108, 162 (1957).
- , «Theory of Superconductivity », *Physical Review* 108, 1175 (1957).
- J. Schwinger, «A Theory of the Fundamental Interactions», *Annals of Physics* 2, 407 (1957).
- N. N. Bogoliubov, «A New Method in the Theory of Superconductivity», *Journal of Experimental and Theoretical Physics (USSR)* 34, 58 [*Soviet Physics JETP* 7, 41] (1958).
- P. W. Anderson, «Coherent Excited States in the Theory of Superconductivity: Gauge Invariance and the Meissner Effect», *Physical Review* 110, 827 (1958).
- , «Random-Phase Approximation in the Theory of Superconductivity», *Physical Review* 112, 1900 (1958).
- Y. Nambu, «Quasiparticles and Gauge Invariance in the Theory of Superconductivity», *Physical Review* 117, 648 (1960).
- Y. Nambu y G. Jona-Lasinio, «Dynamical Model of Elementary Particles Based on an Analogy with Superconductivity, I», *Physical Review* 124, 246 (1961).
- , «Dynamical Model of Elementary Particles Based on an Analogy with Superconductivity, II», *Physical Review* 122, 345 (1961).
- S. L. Glashow, «Partial Symmetries of the Weak Interactions», *Nuclear Physics* 22, 579 (1961).
- J. Goldstone, «Field Theories with Superconductor Solutions», *Nuovo Cimento* 19, 154 (1961).
- J. Goldstone, A. Salam y S. Weinberg, «Broken Symmetries», *Physical Review* 127, 965 (1962).
- J. Schwinger, «Gauge Invariance and Mass», *Physical Review* 125, 397 (1962).
- P. W. Anderson, «Plasmons, Gauge Invariance, and Mass», *Physical Review* 130, 439 (1963).
- A. Klein y B. Lee, «Does Spontaneous Breakdown of Symmetry Imply Zero-Mass Particles?», *Physical Review Letters* 12, 266 (1964).

- W. Gilbert, «Broken Symmetries and the Massless Particles», *Physical Review Letters* 12, 713 (1964).
- F. Englert y R. Brout, «Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons», *Physical Review Letters* 13, 321 (1964).
- , «Broken Symmetries, Massless Particles, and Gauge Fields », *Physics Letters* 12, 134 (1964).
- P. W. Higgs, «Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons», *Physical Review Letters* 13, 508 (1964).
- A. Salam y J. C. Ward, «Electromagnetic and Weak Interactions», *Physics Letters* 13, 168 (1964).
- G. S. Guralnik, C. R. Hagen y T. W. B. Kibble, «Global Conservation Laws and Massless Particles», *Physical Review Letters* 13, 585 (1964).
- P. W. Higgs, «Spontaneous Symmetry Breakdown Without Massless Bosons», *Physical Review* 145, 1156 (1966).
- A. Midgal y A. Polyakov, «Spontaneous Breakdown of Strong Interaction Symmetry and the Absence of Massless Particles», *Journal of Experimental and Theoretical Physics (URSS)* 51, 135 [*Soviet Physics JETP* 24, 91] (1966).
- T. W. B. Kibble, «Symmetry Breaking in Non-Abelian Gauge Theories», *Physical Review* 155, 1554 (1967).
- S. Weinberg, «A Model of Leptons», *Physical Review Letters* 19, 1264 (1967).
- A. Salam, «Weak and Electromagnetic Interactions», *Elementary Particle Theory: Proceedings of the Nobel Symposium held in 1968 at Lerum, Sweden*, N. Svartholm, ed., p. 367, Almqvist and Wiksell (1968).
- G. 't Hooft, «Renormalizable Lagrangians for Massive Yang-Mills Fields», *Nuclear Physics B* 44, 189 (1971).
- G. 't Hooft y M. Veltman, «Regularization and Renormalization of Gauge Fields», *Nuclear Physics B* 44, 189 (1972).

12. MÁS ALLÁ DE ESTE HORIZONTE

Rubin: Ken Crowell, *The Universe at Midnight: Observations Illuminating the Cosmos*, Nueva York, Free Press (2001).

Patt y Wilczek: B. Patt y F. Wilczek, «Higgs-field Portal into Hidden Sectors», <<http://arxiv.org/abs/hep-ph/0605188>>.

colisiones de materia oscura con el cuerpo humano: K. Freese y C. Savage, «Dark Matter Collisions with the Human Body», <<http://arxiv.org/abs/arXiv:1204.1339>>.

«Higgs en el espacio»: C. B. Jackson *et al.*, «Higgs in Space», *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 4, 4 (2010).

Shaposhnikov y Tkachev: M. Shaposhnikov e I.I. Tkachev, «Higgs Boson Mass and the Anthropic Principle», *Modern Physics Letters A* 5, 1659 (1990).

106 GeV: B. Feldstein, L. Hall y T. Watari, «Landscape Predictions for Higgs Boson and Top Quark Masses», *Physical Review D* 74, 095011 (2006).

Weinberg: S. Weinberg, *Physical Review Letters* 59, 2607 (1987).

13. QUE MEREZCA LA PENA DEFENDERLO

Wilson: <<http://blogs.scientificamerican.com/cocktail-party-physics/2011/09/23/protons-and-pistols-remembering-robert-wilson/>>.

Weinberg: <<http://www.nybooks.com/articles/archives/2012/may/10/crisis-big-science/?pagination=false>>.

National Post: <<http://news.nationalpost.com/2012/07/05/higgs-boson-find-could-make-light-speed-travel-possible-scientists-hope/>>.

Mansfield 1: E. Mansfield, «Academic Research and Industrial Innovation», *Research Policy* 20, 1 (1991).

Mansfield 2: E. Mansfield, «Academic Research and Industrial Innovation: An Update of Empirical Findings», *Research Policy* 26, 773 (1998).

Viñeta: Z. Weiner, *Saturday Morning Breakfast Cereal* <<http://www.smbc-comics.com/index.php?db=comics&id=2088>>.

Yahia: <<http://blogs.nature.com/houseofwisdom/2012/07/the-social-aspect-of-the-higgs-boson.html>>.

Evans: entrevista, 4 de julio de 2012.

APÉNDICES

Para más información sobre la helicidad, véase F. Tanedo, «Helicity, Chirality, Mass, and the Higgs», <<http://quantumdiaries.org/2011/06/19/helicity-chirality-mass-and-the-higgs/>>.

Agradecimientos

Me gano la vida como físico, pero mi especialidad es la gravitación teórica y la cosmología; en la física de partículas soy casi un turista, y no he participado directamente en un experimento desde que estudiaba la carrera. Estoy enormemente agradecido a un gran número de personas que generosamente me ayudaron a lo largo de este proyecto, tanto al compartir sus conocimientos como leyendo los borradores del libro.

Un buen número de físicos que se ganan la vida con esto tuvieron la amabilidad de acceder a ser entrevistados para este libro, ya fuese por teléfono o por correo electrónico. Es para mí un placer agradecer a Philip Anderson, John Conway, Gerald Guralnik, Fabiola Gianotti, JoAnne Hewett, Joe Incandela, Gordy Kane, David Kaplan, Mike Lamont, Joe Lykken, Jack Steinberger, Gordon Watts, Frank Wilczek y Sau Lan Wu las conversaciones que mantuvimos, que me resultaron extraordinariamente útiles. Ni que decir tiene que asumo la responsabilidad por todos los posibles errores, y pido disculpas por utilizar solo una minúscula parte de todas las historias que me contaron.

También tuve la suerte de contar con la ayuda tanto de físicos profesionales como de amantes de la ciencia que respondieron a cuestiones específicas o me ofrecieron sus comentarios sobre el texto. Muchas gracias a Allyson Beatrice, Dan Birman, Matt Buckley, Alicia Chang, Lauren Gunderson, Kevin Hand, Ann Kottner, Rick Loverd, Rusi Mchedlishvili, Philip Phillips, Abbas Raza, Henry Reich, Ira Rothstein, Maria Spiropulu, David Saltzberg, Matt Strassler y Zach Weinersmith por dedicar tiempo a leer el libro y a hacerme comentarios al respecto, que han mejorado un millón de veces el manuscrito original. Un agradecimiento especial para Zach por compartir el cómic reproducido en el cuadernillo. Sobran las palabras.

Gracias a mis alumnos y colaboradores, que una vez más demostraron tener

una gran paciencia conmigo cuando desaparecía durante largos períodos de tiempo. (Al menos, parecían pacientes desde mi punto de vista.) Aprovecho también para expresar mi agradecimiento a todos los lectores de nuestro blog, Cosmic Variance, y a todas las personas que han asistido a mis charlas sobre estos temas. El genuino entusiasmo que despiertan la ciencia y el aprendizaje, y que con tanta frecuencia percibo, es para mí fuente constante de asombro y satisfacción.

Sin mi editor, Stephen Morrow, y la gente encantadora de Dutton, es muy probable que nunca me hubiera embarcado en este libro, y desde luego el resultado no habría sido ni remotamente tan bueno. Sin mis agentes, Katinka Matson y John Brockman, probablemente ni siquiera habría escrito ningún libro.

En la dedicatoria de su famoso libro *Gravitation*, Charles Misner, Kip Thorne y John Wheeler expresaban su gratitud hacia sus conciudadanos por apoyar las grandes inversiones científicas. En proyectos enormes, como el del Gran Colisionador de Hadrones, hace falta más que una pequeña contribución gubernamental, junto con un impresionante grado de colaboración internacional. Mi sincero agradecimiento a todas aquellas personas de todos los países del mundo que contribuyen a hacer posible la búsqueda para descubrir los secretos mejor guardados de la naturaleza. Hacer llegar al gran público las maravillas que hemos encontrado es lo menos que podemos hacer.

Me enamoré de la brillante escritora Jennifer Ouellette por su deslumbrante físico, su penetrante intelecto y su atractiva personalidad, no por su infinita paciencia y su inestimable ayuda a la hora de escribir libros. Pero son virtudes que nunca están de más. Para ella, mi amor y agradecimiento eternos.



JoAnne Hewett rapeando sobre materia oscura en un Physics Slam en Eugene, Oregón, en 2011.
© JACK LIU



En el CERN, el 4 de julio de 2012, Fabiola Gianotti, Rolf Heuer y Joe Incandela a punto de hacer el gran anuncio. © CERN



Leon Lederman, junto al Fermilab. LABORATORIO DEL ACELERADOR NACIONAL FERMILAB



Sau Lan Wu, de la Universidad de Wisconsin, que ha participado en la búsqueda del Higgs tanto en el LEP como en el LHC.

JEFF MILLER/UNIVERSIDAD DE WISCONSIN



Carlo Rubbia, descubridor de los bosones W y Z e impulsor del LHC.
CREATIVE COMMONS



Fabiola Gianotti, portavoz de ATLAS en 2011 y 2012. © CERN



Lyn Evans, el hombre que construyó el LHC. © CERN



Vista aérea del CERN y el Gran Colisionador de Hadrones, en la que están señalados los grandes experimentos. El anillo real es subterráneo y no es visible desde el aire. © CERN



Esfera de la ciencia y la innovación en el CERN, una llamativa edificación hace las veces de símbolo del laboratorio y acoge exposiciones dirigidas al gran público sobre la física de partículas y sobre la misión del CERN. © CERN



Interior del túnel del LHC, con los imanes dipolares instalados y listos para entrar en funcionamiento. © CERN

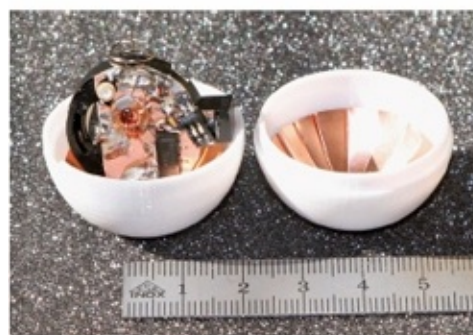
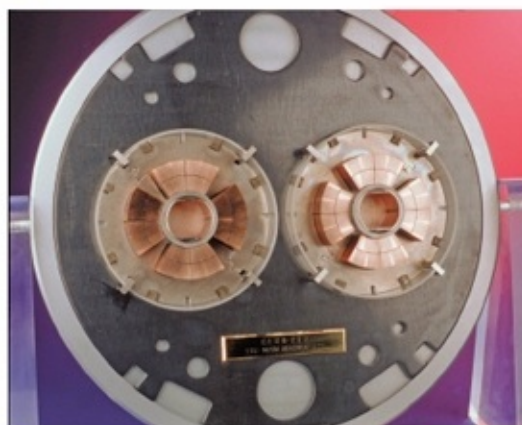


Daños sufridos por los imanes del LHC tras el accidente del 19 de septiembre. © CERN



Todos los protones del haz del LHC provienen de esta pequeña bombona de hidrógeno, que contiene protones suficientes para alimentar al LHC durante mil millones de años. © CERN

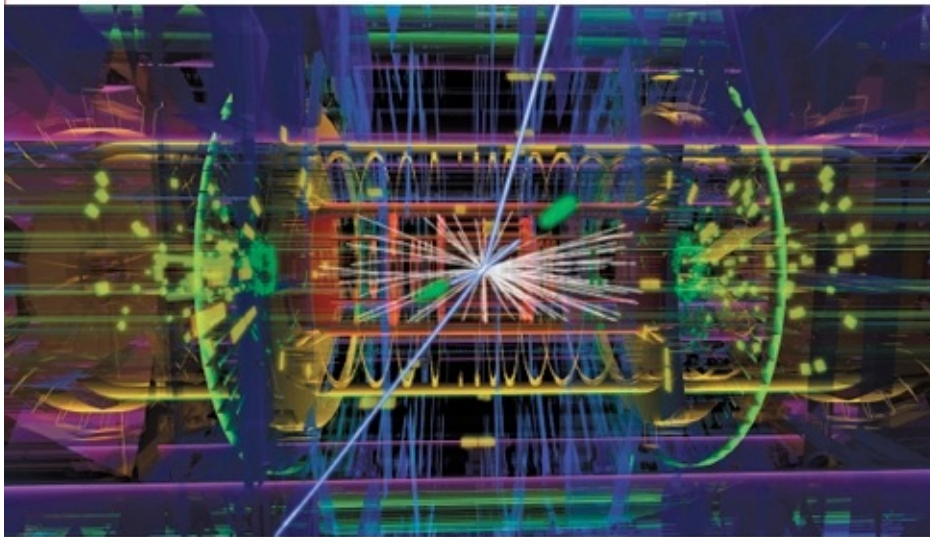
Sección transversal de los imanes dipolares del LHC. Por los dos tubos de los haces se mueven los protones en direcciones opuestas. © CERN



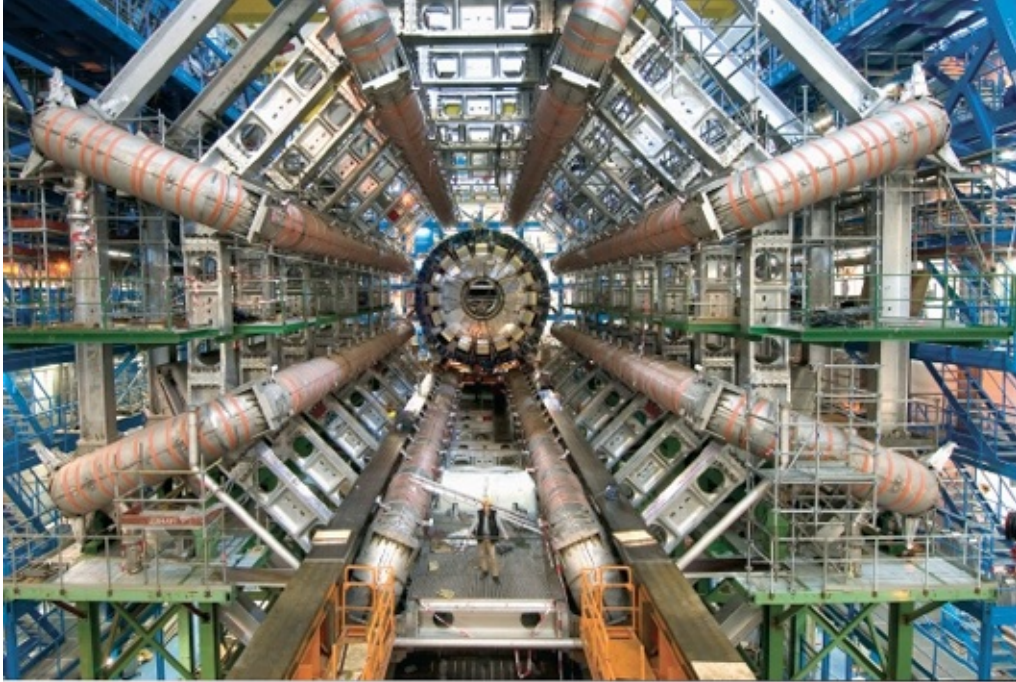
Una de las «pelotas de ping-pong» equipadas con un radiotransmisor que se introdujeron en el tubo del haz del LHC para comprobar si había alguna obstrucción.
LYN EVANS



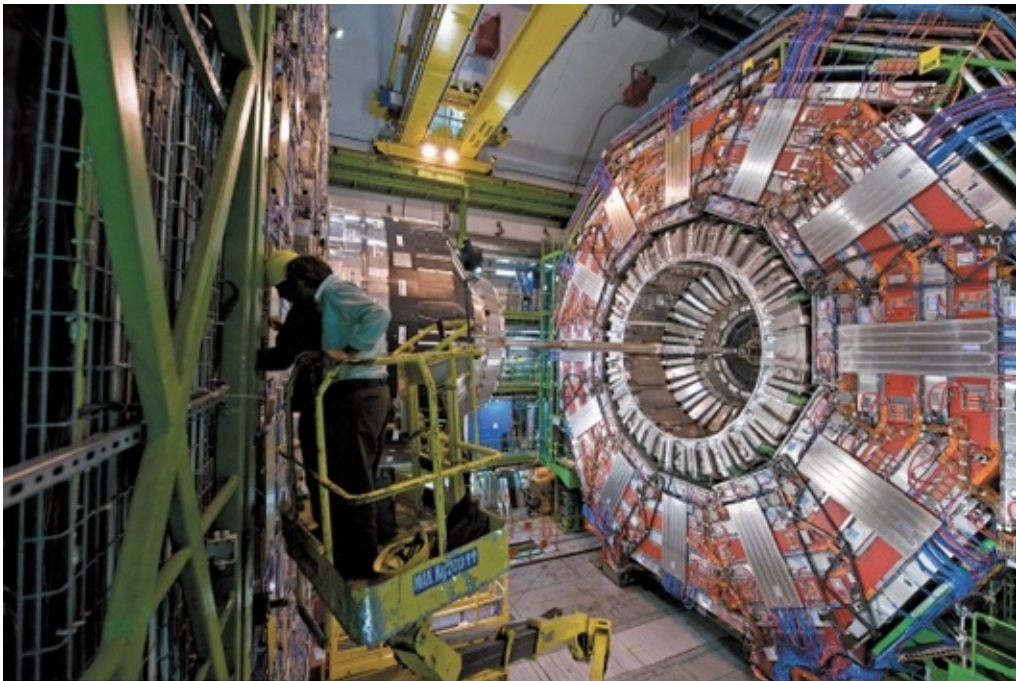
Joe Incandela, portavoz de CMS en 2012. © CERN



Un posible evento Higgs en el detector ATLAS. Las dos largas líneas azules son muones, y las líneas azules cortas son electrones, de manera que esto podría representar la desintegración del Higgs en dos bosones Z. © CERN



El detector ATLAS en construcción. Fijese en la persona que aparece en la zona inferior del centro de la imagen. Las ocho tuberías gigantes son imanes, que se utilizan para desviar a los muones y así poder medir sus energías. © CERN

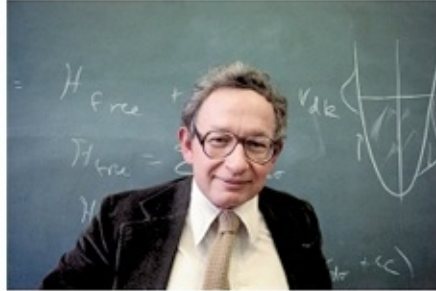


El detector CMS en construcción. © CERN



Yoichiro Nambu, pionero de la ruptura de simetría, los gluones y la teoría de cuerdas.
CREATIVE COMMONS/BESTYTHEDEVINE

Philip Anderson, referente en física de la materia condensada y cascarrabias amable.
CREATIVE COMMONS/PHILIP WARREN



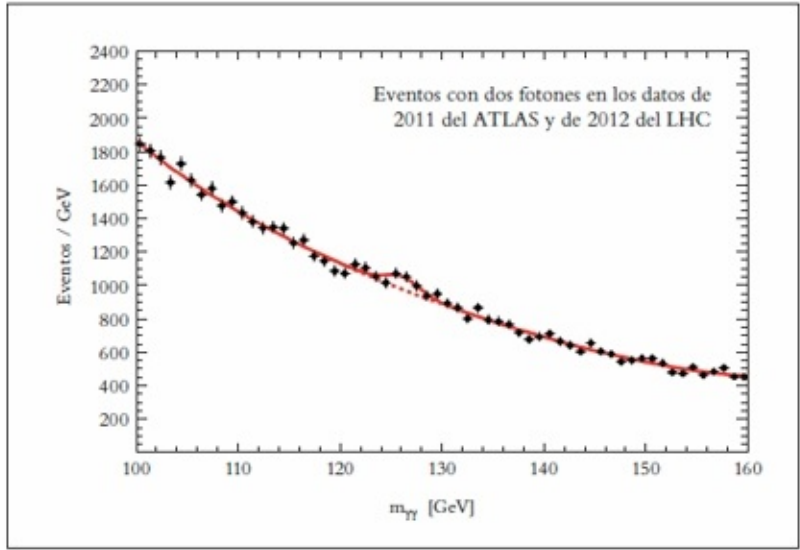
De izquierda a derecha: Tom Kibble, Gerald Guralnik, Carl Richard Hagen, François Englert y Robert Brout en la ceremonia de entrega del premio Sakurai 2010. Peter Higgs también compartió el galardón, pero no acudió.



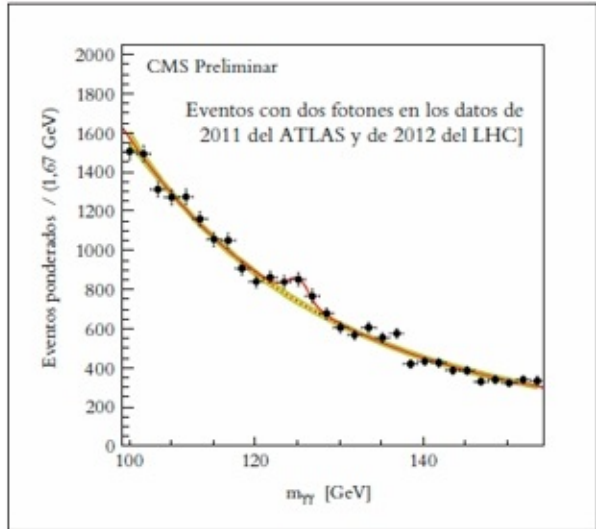
Peter Higgs visitando el experimento ATLAS. © CERN



De izquierda a derecha: Sheldon Glashow, Abdus Salam y Steven Weinberg, en la ceremonia de entrega de premio Nobel de 1979. © BETTMANN/CORBIS



Los datos producidos y analizados en la búsqueda del Higgs en el LHC. Estas gráficas muestran el número de eventos que producen dos fotones de alta energía, donde la energía total de los fotones va desde 100 a 160 GeV, en los datos de 2011-2012 de ATLAS y CMS. Las líneas de puntos marcan la predicción sin ningún bosón de Higgs; la línea continua incluye un Higgs con una masa de 126,5 GeV (ATLAS) o 125,3 GeV (CMS). © CERN



© CERN



Por qué nos dedicamos a la ciencia. ZACH WEINERSMITH, SATURDAY MORNING BREAKFAST CEREAL.

Diagrama de flujo del Modelo Estándar

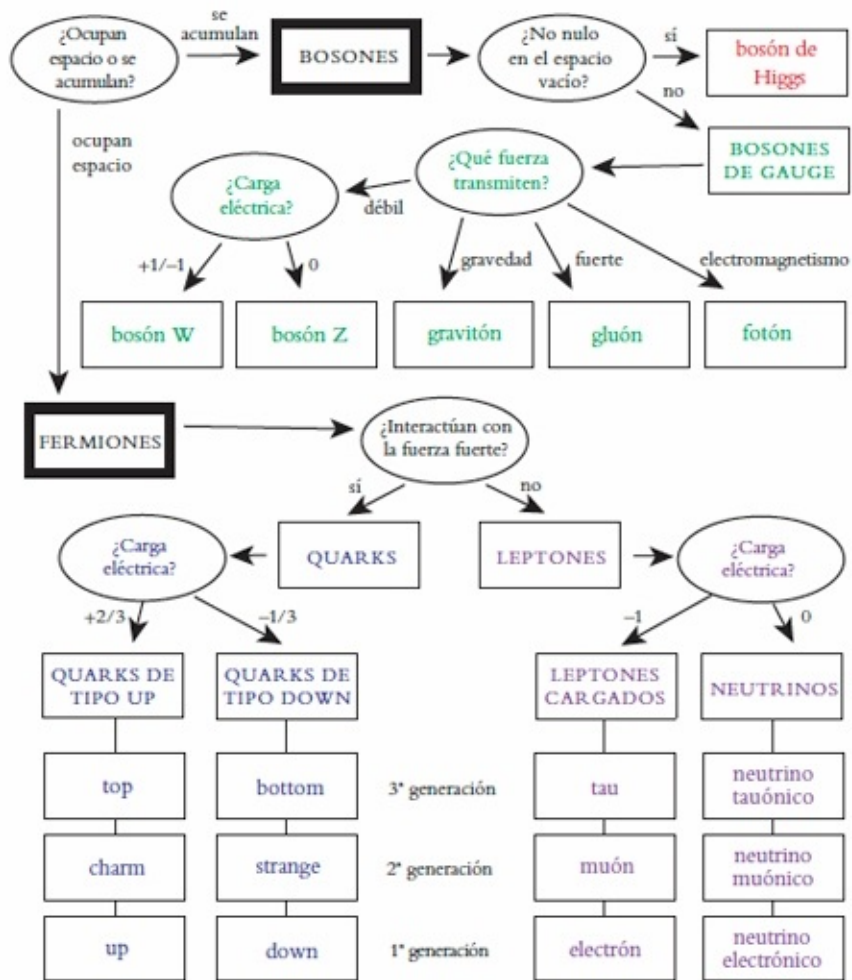


Diagrama de flujo que ilustra las partículas elementales del Modelo Estándar. Esta es la versión moderna de la tabla periódica de los elementos. Los quarks aparecen en azul, los leptones en morado, los bosones de gauge en verde y el bosón de Higgs en rojo. SEAN CARROLL

* Existe la creencia, infundada, de que durante los solsticios (o, según otras versiones, los equinoccios) es posible hacer que un huevo se mantenga indefinidamente erguido en equilibrio. (*N del T.*)

* Referencia a la expresión «Todos los hombres son creados iguales», una de las «verdades evidentes» que recoge la Declaración de Independencia de Estados Unidos. (*N. del T.*)

Sean Carroll es físico teórico en California Institute of Technology, Caltech, especializado en cosmología, teoría de campos y gravitación. Es autor de *From Eternity to Here: The Quest for the Ultimate Theory of Time* (Dutton, 2010) y del libro de texto para cursos de doctorado *Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity*. También ha grabado una serie de 24 clases de 30 minutos sobre cosmología, tituladas *Dark Matter, Dark Energy: The Dark Side of the Universe*. Tras doctorarse en Harvard continuó sus investigaciones en cosmología, física de partículas y gravitación. Es uno de los fundadores del blog colectivo *Cosmic Variance*. Sean Carroll vive en Los Angeles con su mujer, la escritora Jennifer Ouellette.

<http://preposterousuniverse.com/>

[Sean Carroll en TED](#)

Título original: *The Particle at the End of the Universe*

Edición en formato digital: noviembre de 2013

© 2012, Sean Carroll

© 2013, Penguin Random House Grupo Editorial, S. A. U.

Travessera de Gràcia, 47-49. 08021 Barcelona

© 2013, Marcos Pérez Sánchez, por la traducción

Diseño de la cubierta: Nora Grosse / Penguin Random House Grupo Editorial

Penguin Random House Grupo Editorial apoya la protección del *copyright*. El *copyright* estimula la creatividad, defiende la diversidad en el ámbito de las ideas y el conocimiento, promueve la libre expresión y favorece una cultura viva. Gracias por comprar una edición autorizada de este libro y por respetar las leyes del *copyright* al no reproducir ni distribuir ninguna parte de esta obra por ningún medio sin permiso. Al hacerlo está respaldando a los autores y permitiendo que PRHGE continúe publicando libros para todos los lectores. Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos, <http://www.cedro.org>) si necesita reproducir algún fragmento de esta obra.

ISBN: 978-84-9992-389-5

Conversión a formato digital: M. I. maqueta, S.C.P.

www.megustaleer.com

Índice

La partícula al final del universo

Prólogo

1. La idea

2. A vueltas con lo divino

3. Átomos y partículas

4. La historia del acelerador

5. La máquina más grande jamás construida

6. Hacia la sabiduría a base de choques

7. Partículas en las ondas

8. A través de un espejo roto

9. El mundo a sus pies

10. Difundiendo el mensaje

11. Sueños del Nobel

12. Más allá de este horizonte

13. Que merezca la pena defenderlo

Apéndice 1: Masa y espín

Apéndice 2: Las partículas del Modelo Estándar

Apéndice 3: Las partículas y sus interacciones

Lecturas adicionales

Referencias

Agradecimientos

Imágenes

Notas

Biografía

Créditos