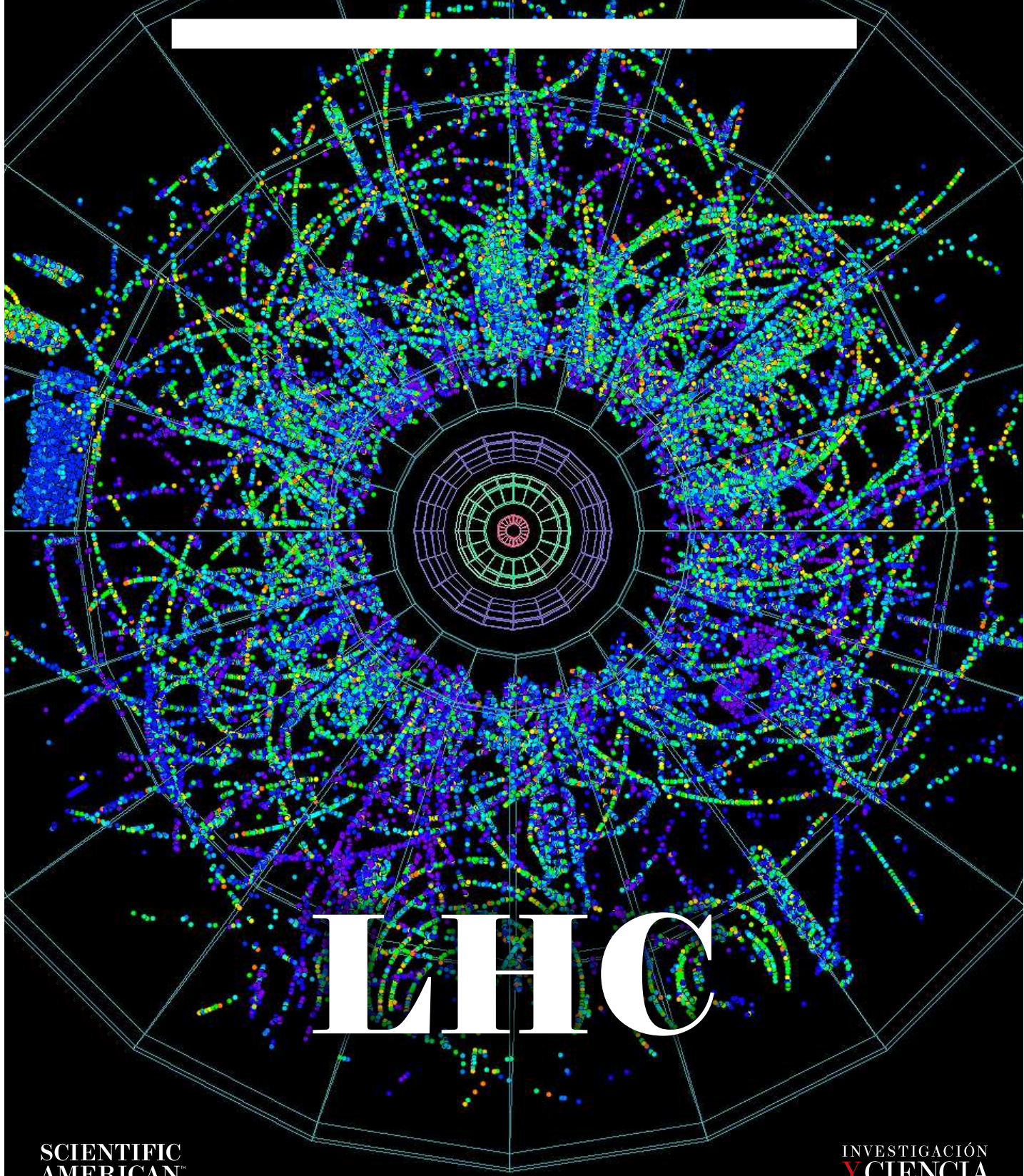


ESPECIAL



LHC

SCIENTIFIC
AMERICAN™

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

ESPECIAL LHC

CONTENIDO



Una selección de nuestros mejores artículos para ahondar en la ciencia del **Gran Colisionador de Hadrones**.

Viaje a la escala electrodébil

Martin Gorbahn y Georg Raffelt
Investigación y Ciencia, abril 2011

La búsqueda del bosón de Higgs

Martine Bosman y Teresa Rodrigo
Investigación y Ciencia, septiembre 2012

Una red global de computación para el LHC

José M. Hernández Calama y Gonzalo Merino
Investigación y Ciencia, marzo 2014

De la superconductividad al bosón de Higgs

Miguel Ángel Vázquez-Mozo
Investigación y Ciencia, julio 2014

¿Esconde el bosón de Higgs nueva física?

John Ellis
Investigación y Ciencia, diciembre 2012

La supersimetría y la crisis de la física

Joseph Lykken y Maria Spiropulu
Investigación y Ciencia, junio 2014

«Hemos caído en la tentación de vender descubrimientos»

Ernesto Lozano Tellechea
Investigación y Ciencia, agosto 2014

«Tal vez estemos llegando al final de un ciclo»

Ernesto Lozano Tellechea
Investigación y Ciencia, septiembre 2014

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1ª, 08021 Barcelona (España)
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

Copyright © Prensa Científica, S.A. y Scientific American, una división de Nature America, Inc.

ESPECIAL n.º 4 ISSN: 2385-5657

Martin Gorbahn pertenece al grupo de excelencia Universe y al Instituto para Estudios Avanzados de la Universidad Técnica de Múnich, donde investiga la física más allá del modelo estándar, el origen de la masa de las partículas y el problema de las jerarquías.



Georg Raffelt investiga en el Instituto Max Planck de Física y forma parte del grupo de excelencia Universe. Sus estudios se centran en astropartículas y cosmología; en particular, en la física de neutrinos y la búsqueda de los constituyentes de la materia oscura.

ALTAS ENERGÍAS

Viaje a la escala electrodébil

Por qué el Gran Colisionador de Hadrones del CERN deberá encontrar nueva física

Martin Gorbahn y Georg Raffelt

EL GRAN COLISIONADOR DE HADRONES (LHC) DEL CERN, cerca de Ginebra, comenzó a acelerar protones a principios de 2010. La energía de sus experimentos supera a la alcanzada jamás en cualquier otro acelerador. Por primera vez, será posible estudiar las fuerzas de la naturaleza entre partículas elementales a distancias del orden de 10^{-19} metros: la diezmilésima parte del diámetro de un protón. Esta distancia, la escala electrodébil, desempeña un papel fundamental en la física de partículas: cuando dos partículas se acercan a distancias de ese orden, la fuerza electromagnética y la interacción débil comienzan a comportarse de manera similar.

Según el principio de incertidumbre de Heisenberg, para estudiar las fuerzas que actúan entre partículas elementales se requiere una energía mayor cuanto menores sean las distan-

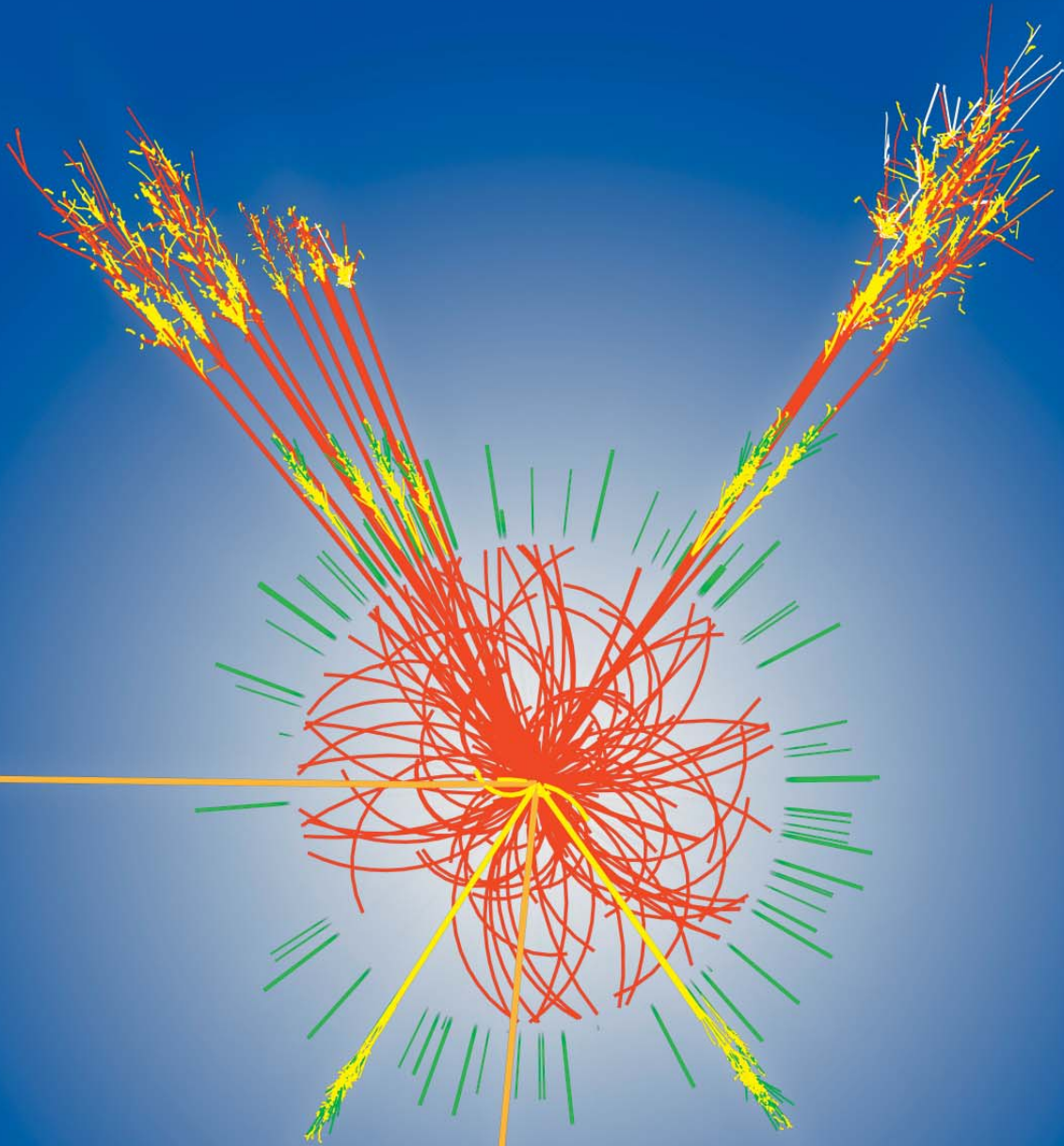
cias a las que se investiga. La escala electrodébil se corresponde aproximadamente con una energía de un teraelectronvoltio (TeV, o 10^{12} electronvoltios), una energía unas mil veces mayor que la asociada a la masa de un protón. Unos 10^{-13} segundos después de la gran explosión, el universo se enfrió hasta alcanzar una temperatura equivalente a la energía de un TeV. De esta manera, gracias a los grandes aceleradores de partículas resulta posible investigar la evolución del universo «en dirección contraria»: a energías cada vez más altas y distancias cada vez más cortas. Cuestiones como la asimetría cósmica entre materia y antimateria o la existencia de materia oscura constituyen, con toda probabilidad, vestigios de esa prehistoria. A ambas les debe el universo su existencia y estructura actuales. Sin embargo, el modelo estándar no logra explicar ninguno de los dos fenómenos.

EN SÍNTESIS

El Gran Colisionador de Hadrones del CERN experimentará a energías equiparables a las que se alcanzaron unos 10^{-13} segundos después de la gran explosión. Ello permitirá estudiar la materia a distancias del orden de la diezmilésima parte del tamaño de un protón.

Se sabe que a tales energías habrán de observarse fenómenos nuevos, ya se trate de la partícula de Higgs o de interacciones hasta ahora desconocidas. En cualquier caso, el mecanismo responsable de la ruptura de simetría electrodébil debería manifestarse a esa escala.

No solo se espera completar el modelo estándar de la física de partículas. El LHC también podría hallar partículas supersimétricas o aquellas que componen la materia oscura. Varios indicios apuntan a la posibilidad de que ambas aparezcan a la escala del teraelectronvoltio.



Con el Gran Colisionador de Hadrones, los físicos del CERN esperan demostrar la existencia del bosón de Higgs, de la que hasta ahora solo cuentan con indicios teóricos. La imagen muestra la simulación de un proceso de producción de Higgs en el detector ATLAS del LHC.

El principio de incertidumbre, masa y energía

La física de partículas depende de manera crucial de las leyes de la mecánica cuántica. El principio de incertidumbre constituye una ley cuántica descubierta por Werner Heisenberg, cuya formulación podemos ver aquí de su puño y letra. En su forma más básica, dicho principio afirma que la posición q y el momento p de cualquier objeto no pueden determinarse a la vez con total precisión:

$$\Delta p \cdot \Delta q \geq \frac{1}{2} \hbar$$

Debido al ínfimo valor de la constante \hbar (la constante de Planck h dividida por 2π), sus efectos solo son relevantes en el estudio de objetos microscópicos.

Estudiar las leyes físicas a distancias microscópicas requiere resolver la posición de las partículas con gran precisión, por lo que Δq ha de tomar un valor pequeño. Ello implica que la indeterminación en el momento y, con ella, el momento en sí, han de ser elevados. Algo parecido sucede en óptica, donde la resolución angular de un microscopio o un telescopio aumenta con la frecuencia de la luz. Se necesitan, por tanto, momentos elevados, es decir, altas energías para estudiar el microcosmos. Por ello, la física de partículas recibe tan a menudo el apelativo de física de altas energías: la distancia más corta a la que se puede resolver un fenómeno es proporcional a la mayor energía que logre alcanzar un acelerador.

El principio de incertidumbre implica que el alcance de una interacción es inversamente proporcional a la masa de la partícula que la transmite [véase «De una nota desafinada al principio de incertidumbre», por N. Treitz; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2011]. La interacción electromagnética posee un alcance infinito, ya que el fotón carece de masa. La interacción débil, en cambio, es de corto alcance, puesto que la masa de los bosones Z y W asciende a unas cien veces la masa del protón.

Otra constante fundamental de la naturaleza es la velocidad de la luz en el vacío, c . Esta desempeña el papel de velocidad límite relativista: la mayor velocidad a la que pueden transmitirse energía o información. Según la ecuación de Einstein:

$$E = mc^2$$

a cada energía le corresponde una masa equivalente, ya que masa y energía pueden transformarse una en otra. Por eso, los físicos de partículas no suelen distinguir entre ellas y miden ambas en las mismas unidades. En física de partículas se emplean los múltiplos del electronvoltio (eV), que equivale a la energía que gana un electrón cuando se acelera en una diferencia de potencial de un voltio. La masa del protón, por ejemplo, asciende a $0,935 \text{ GeV}/c^2$, lo que normalmente se expresa como $0,935 \text{ GeV}$ ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$). En estas unidades, la masa del electrón toma el valor de $0,511 \text{ MeV}$ ($1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$).

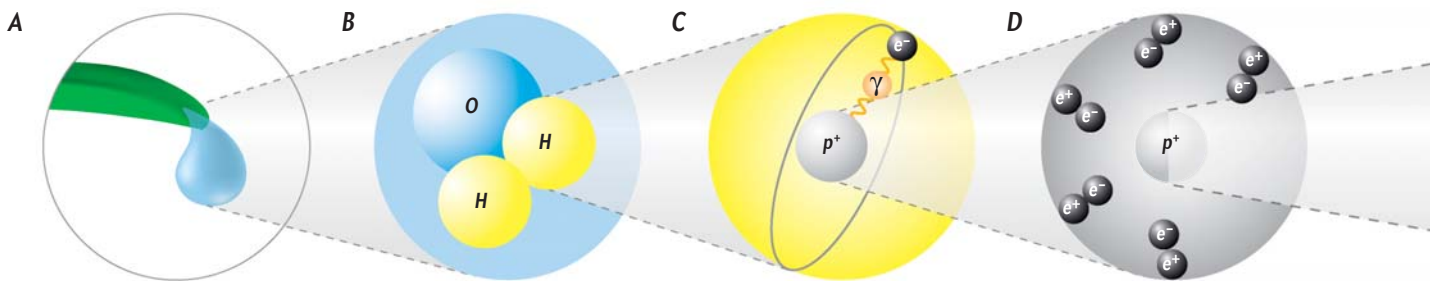
CUATRO INTERACCIONES FUNDAMENTALES

¿Qué entendemos por modelo estándar? ¿Dónde residen sus puntos fuertes y dónde sus límites? ¿Por qué las interacciones se comportan de una manera u otra según la distancia considerada? Para responder a tales cuestiones, hemos de atender primero a las propiedades cuánticas de las partículas elementales. El modelo estándar se asienta sobre la teoría cuántica de campos y las relaciones de simetría que dictan las interacciones entre partículas. Junto con la teoría de la relatividad, constituyen probablemente los edificios teóricos más

abstractos y, al mismo tiempo, más exitosos que jamás se hayan construido.

Según la teoría cuántica de campos, todas las partículas elementales aparecen como excitaciones de campos cuánticos. Estos incluyen tanto las partículas de materia como las encargadas de transmitir las interacciones. El modelo estándar contempla tres interacciones fundamentales. La fuerza electromagnética es la relevante a distancias atómicas y la que, por ejemplo, mantiene unidos al electrón y al protón en un átomo de hidrógeno. Desde un punto de vista cuántico, esta interac-

Constitución de la materia



10^{-2} metros

Una gota de agua de 4 milímetros de diámetro se compone de 10^{21} moléculas.

10^{-9} metros

Una molécula de agua consta de un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno.

10^{-10} metros

Un átomo de hidrógeno se encuentra formado por un electrón (e^-) y un protón (p^+). La interacción electromagnética entre ambos tiene lugar mediante el intercambio de un fotón (γ).

10^{-13} metros

De las fluctuaciones del vacío surgen electrones y positrones (e^+), los cuales apantallan la carga del protón.

ción se explica mediante el intercambio de fotones, las partículas que componen la luz. La interacción fuerte actúa a distancias nucleares. Es la responsable de unir a tres quarks para formar un protón o un neutrón; sus efectos se transmiten mediante el intercambio de partículas denominadas gluones. Por último, la interacción débil actúa a distancias inferiores a 10^{-18} metros y es la responsable de la desintegración beta de los núcleos radiactivos. Sus partículas mediadoras son los bosones W^+ , W^- y Z^0 .

Las partículas de intercambio se acoplan a las partículas de materia según la carga que estas posean, la cual puede ser de diferentes tipos: carga eléctrica, fuerte (también denominada «carga de color») o débil. Los electrones, por ejemplo, poseen solo carga eléctrica y débil. Los quarks son también portadores de carga fuerte. La intensidad con la que las partículas mediadoras se acoplan a la carga correspondiente viene determinada por la constante de acoplamiento. Existen tres constantes de acoplamiento, una por cada interacción fundamental. El valor de dichas constantes depende de la distancia (y, por tanto, de la energía) a la que tienen lugar las interacciones.

Queda aún una cuarta interacción fundamental de la naturaleza: la gravedad, la cual esconde más preguntas que respuestas. Esta fuerza no se deja enmarcar con facilidad en una teoría cuántica y no forma parte del modelo estándar. No actúa sobre carga alguna, sino sobre todo tipo de masa o energía. Además, es una interacción siempre atractiva. A pesar de su pequeña intensidad, es la fuerza que determina la evolución del universo a escalas cósmicas.

EL ROMPECABEZAS DE LA MASA

Cada una de las cuatro interacciones reviste una importancia relativa frente al resto según la escala de distancias que consideremos. A escalas macroscópicas, la fuerza electromagnética no suele jugar ningún papel relevante. Ello se debe a que la materia normal no porta carga eléctrica neta y los efectos de las

Esta serie de imágenes muestra la constitución de la materia en diez pasos a diferentes escalas: desde distancias macroscópicas hasta aquellas en las que se cree que se unifican todas las interacciones.

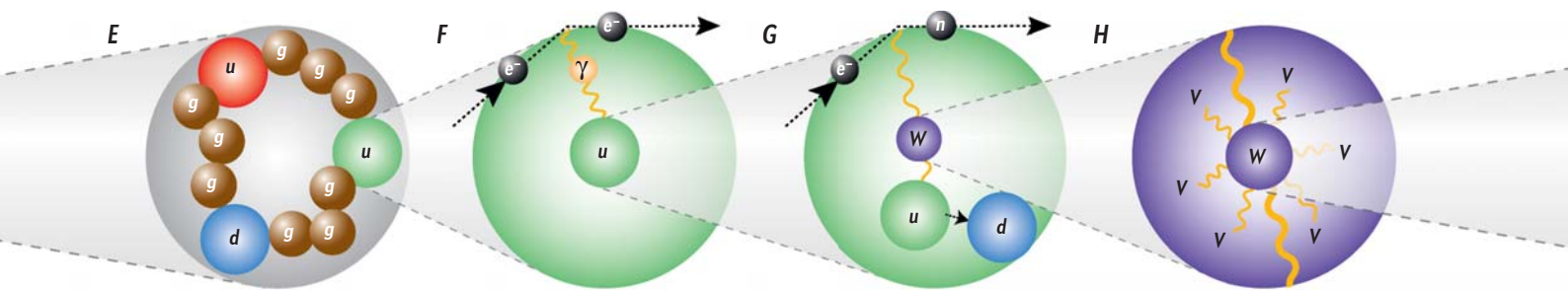
cargas positivas y negativas se neutralizan. También ocurre así con la interacción fuerte y las cargas de color, a pesar de que los gluones, al igual que los fotones, carecen de masa. (El alcance de cualquier interacción mediada por una partícula sin masa es, en principio, infinito. Sin embargo, hace falta que las partículas mediadoras puedan «ver» cargas netas para poder actuar.) Por el contrario, la interacción débil presenta la particularidad de que sus partículas de intercambio, los bosones W y Z , poseen una gran masa. Ello limita de manera fundamental el alcance de la interacción.

La masa de los bosones débiles supone un rompecabezas teórico, ya que, en principio, todas las partículas mediadoras deberían carecer de masa. Para explicar el origen de la masa de los bosones W y Z se requiere introducir en el modelo estándar una partícula adicional: el bosón de Higgs. Hasta ahora, esta partícula no se ha encontrado. Como razón, se esgrime que los experimentos realizados hasta la fecha no han alcanzado la energía que se supone necesaria para producirla. Si bien la gran mayoría de los físicos de partículas cree que la energía a la que operará el LHC bastará para confirmar la existencia del bosón de Higgs, no es menos cierto que podrían existir otros mecanismos que solucionasen el problema de la masa de los bosones débiles. Algunos expertos conservan la esperanza de que el bosón de Higgs no aparezca y que, en su lugar, se produzcan descubrimientos inesperados más allá del modelo estándar.

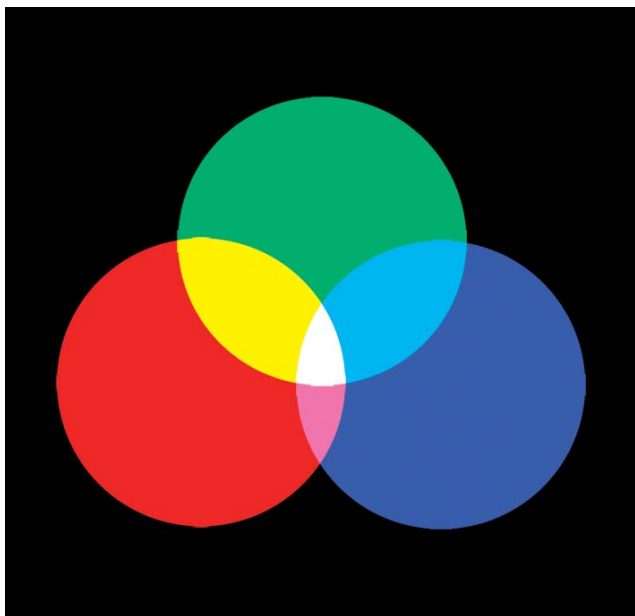
Para entender mejor cómo surge la masa de las partículas en una teoría cuántica de campos, por qué las fuerzas actúan de manera diferente según la distancia, o qué fenómenos nuevos pueden aparecer a la escala electrodébil (1 TeV, o distancias de 10^{-19} metros) hemos de emprender un viaje al interior del mundo cuántico a distancias cada vez menores.

DEL ÁTOMO AL PROTÓN

Comencemos por las distancias atómicas, unos 10^{-10} metros, y consideremos el átomo de hidrógeno. Se trata del estado ligado entre un protón, con carga positiva, y un electrón, de carga negativa. La masa del átomo de hidrógeno se aproxima mucho a la suma de las masas del electrón y el protón; no obstante, a ello hay que restar la masa correspondiente a la energía de enlace (la atracción electromagnética que los mantiene unidos). Según la equivalencia entre masa y energía de Einstein ($E = mc^2$),



10^{-16} metros	10^{-17} metros	10^{-18} metros	10^{-19} metros
Un protón se compone de dos quarks arriba (u) y un quark abajo (d). Estos permanecen unidos gracias al intercambio de gluones (g). La energía de enlace genera la mayor parte de la masa del protón.	La interacción entre un quark arriba y un electrón se debe al intercambio de fotones.	A estas distancias, la interacción mediada por un bosón W cobra cada vez mayor importancia, debido a que la distancia de 10^{-18} metros se corresponde aproximadamente con la masa del bosón W.	La carga débil del bosón W se acopla al vacío (V). Ello explica el origen de su masa.



1+1+1 = 0: Un protón se compone de tres quarks, cada uno de ellos con una «carga de color» diferente. Sin embargo, la carga de QCD neta del protón es neutra. Esta imagen proporciona una analogía del fenómeno: al igual que la luz blanca aparece como la superposición de tres colores, la combinación de tres quarks en un protón da como resultado un estado sin carga de color.

dicha energía contribuye a la masa total del átomo de hidrógeno en unas 13 milmillonésimas partes.

Ampliemos ahora mil veces la potencia de nuestro microscopio y examinemos qué ocurre en las inmediaciones del protón, a una distancia de unos 10^{-13} metros. Debido a que esa escala se aproxima a la que se corresponde con la masa del electrón (unos 0,5 MeV), a tales distancias observaremos un nuevo efecto cuántico: la creación y aniquilación de pares de electrones y positrones (la antipartícula del electrón). Dichos pares surgen del vacío, por lo que al fenómeno se le denomina fluctuaciones cuánticas del vacío. Los pares que se materializan muy cerca del protón se orientan ligeramente con respecto a este: el protón atrae hacia sí los electrones y repele los positrones.

A través de esta «polarización del vacío», la carga original del protón se ve algo apantallada cuando se observa desde lejos. Pero, si penetramos en esa nube de pares de partículas y antipartículas, comprobaremos que la intensidad de la interacción electromagnética aumentará cuanto más nos acerquemos al protón. Asimismo, a distancias aún menores, aparecen pares de quarks y antiquarks que contribuyen al apantallamiento

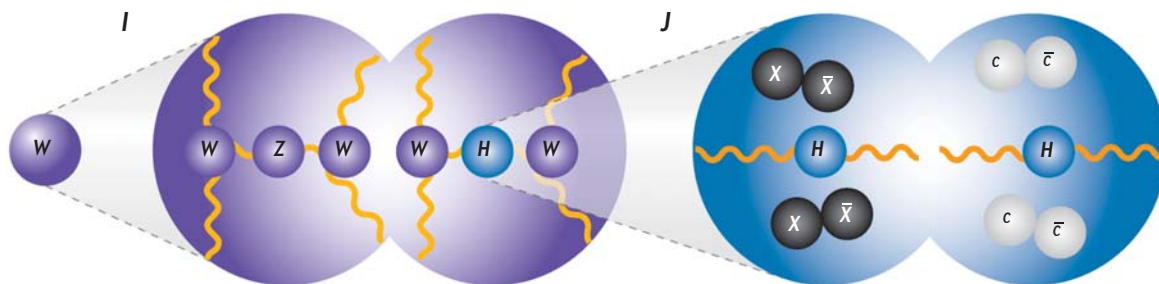
de la carga eléctrica del protón y, con ello, a un incremento de la constante de acoplamiento electromagnética cuando nos acercamos aún más.

QUARKS Y GLUONES

Aumentemos mil veces más la imagen. Solo cuando alcanzamos los 10^{-16} metros resulta posible resolver la estructura del protón. Este se compone de dos quarks *arriba* y un quark *abajo*. Sin embargo, las masas de los quarks solo dan cuenta de una pequeña fracción de la masa del protón. Al contrario de lo que ocurría con el átomo de hidrógeno, ahora es la energía de enlace entre quarks la que contribuye a la mayor parte de la masa total.

Para explicar el origen de esa energía de enlace y la manera en que los quarks se unen en un protón necesitamos una fuerza más: la interacción fuerte. La teoría cuántica de campos que la describe, desarrollada durante la década de los sesenta del siglo xx, se denomina cromodinámica cuántica (QCD, por sus siglas en inglés). Al igual que la carga eléctrica puede ser de dos tipos (positiva o negativa), los quarks pueden poseer una de tres cargas de color posibles. La suma de las tres cargas de color distintas da cero como resultado, de ahí la metáfora cromática: la unión de los tres colores primarios de la luz (rojo, verde y azul) produce luz blanca.

A bajas energías, los quarks solo aparecen en estados confinados cuya carga neta de color es neutra, como el protón. En consecuencia, a distancias mayores que el radio del protón, la interacción fuerte queda apantallada. Los quarks no pueden existir de forma aislada, lo que hizo que en un principio se discutiera su interpretación como partículas auténticas. Si miramos el protón a distancias menores e investigamos la dinámica de los quarks a energías más altas, veremos que estos se comportan de manera similar a partículas libres, un fenómeno denominado «libertad asintótica». Por este descubrimiento trascendental, David Gross, Hugh David Politzer



10^{-19} metros

Los bosones W interactúan mediante el intercambio de un fotón, un bosón Z o una partícula de Higgs (H). Si la masa del Higgs excediese el TeV, la interacción entre bosones W dejaría de ser débil.

10^{-32} metros

Las fluctuaciones del vacío de las partículas (X) que deberían aparecer a estas escalas modifican la masa del bosón de Higgs en diez órdenes de magnitud. En caso de existir, las partículas supersimétricas suprimirían ese aumento de masa.