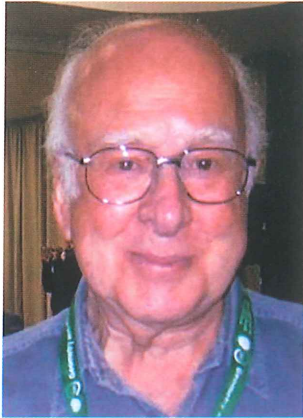


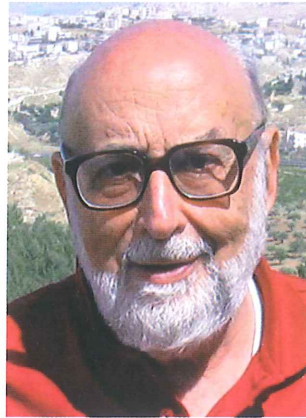
Premio Nobel de Física 2013

EL BOSÓN DE HIGGS

Rafael Bachiller García



Peter W. Higgs



François Englert

El día 8 de octubre de 2013 la Academia Nobel anunció la concesión del Premio Nobel de Física 2013 a los Doctores Peter W. Higgs y François Englert por *“el descubrimiento teórico de un mecanismo que contribuye a nuestra comprensión del origen de la masa de las partículas subatómicas, y que ha sido confirmado recientemente mediante el descubrimiento de la partícula fundamental predicha, por los experimentos ATLAS y CMS del Gran Colisionador de Hadrones del CERN”*.

Este premio seguía pues al descubrimiento anunciado por el CERN en un gran evento mediático el día 4 de julio de 2012 de una nueva partícula fundamental con propiedades similares a las predichas para el bosón de Higgs, partícula clave del Modelo Estándar de la física de partículas. Según sus descubridores esta nueva partícula era realmente el bosón de Higgs “más allá de cualquier duda razonable”.

Aunque predicho en 1964 por 6 físicos entre los que se encontraban los Doctores Higgs, Englert y Brout, la detección del bosón escalar que se supone res-

ponsable de la masa de las partículas elementales necesitó de casi medio siglo de trabajos de millares de físicos, de la construcción del LHC, el mayor acelerador de partículas del mundo, y de dos años de intensas y delicadas medidas con este instrumento.

Pero la historia del bosón de Higgs comienza mucho antes, se remonta a la Grecia Antigua, momento en el que se empezó a estudiar la estructura de la materia con cierto método científico.

■ Introducción: átomos y vacío

“Nada existe, excepto átomos y espacio vacío; lo demás es opinión”. Así resumía y sentenciaba Demócrito de Abdera sus ideas, y la de su maestro Leucipo, sobre la estructura de la materia hace unos 2.500 años. En el siglo XX estas palabras cobraron una dimensión muy especial. Naturalmente los átomos de Demócrito, las entidades residuales del proceso de división de la materia que no puede continuar indefinidamente, no se corresponden con nuestros átomos, los de la física actual, constituidos por un núcleo rodeado por un enjambre de electrones.

Los átomos de Demócrito se corresponden mejor hoy con los quarks, pero es un concepto que sigue de plena actualidad, como de plena actualidad sigue la importancia del vacío evocada por el gran filósofo de Abdera. En efecto, nuestro átomo no es más que una entidad esencialmente vacía, en cuyas profundidades reside el diminuto núcleo hecho a su vez de quarks. Pero la física actual nos asegura que el espacio vacío no es lo mismo que la nada. Al asegurar que “nada existe, excepto átomos y espacio vacío”, Demócrito nos adelanta un concepto fundamental de la ciencia moderna: el concepto de campo de energía. En el vacío pueden residir un campo tan importante como el gravitatorio o el electromagnético, ingredientes esenciales de la realidad, responsables de la estructura del universo exactamente al mismo nivel que las partículas elementales (y de hecho representados por otras partículas adicionales).

Con el pretexto del bosón de Higgs, una partícula que representa uno de esos campos fundamentales (el campo de Higgs), este artículo narra una gran aventura de la humanidad: el estudio de la estructura de la materia que ha desembocado en la caza exhaustiva del escurridizo bosón. Aunque partiendo de la ciencia básica, estos estudios de la materia han tenido un impacto enorme en la construcción de

todo el mundo moderno. Todos los métodos de obtención de energía, todos los desarrollos de nuevos materiales y de los compuestos químicos, tienen su raíz en el estudio de la materia y de las partículas elementales.

De Empédocles a Gell-Mann

En paralelo con los atomistas Leucipo y Demócrito (460-370 a.C.), Empédocles de Agrigento (ca. 492-ca. 432 a.C.) había desarrollado un modelo del mundo en el que 4 'raíces' o sustancias diferentes (agua, aire, fuego y tierra) podrían combinarse siguiendo las fuerzas denominadas Amor ($\phi\iota\lambda\iota\alpha$) y Odio ($\nu\epsilon\iota\kappa\omicron\varsigma$) para dar lugar a toda la materia visible. Estas ideas fueron desarrolladas más aún por Platón (ca. 427-347 a.C.) que asoció las cuatro sustancias a cuatro formas geométricas fundamentales que podían constituirse a partir de triángulos simples. Las cuatro sustancias fueron después denominadas 'elementos' por Aristóteles (384-322 a.C.), quien añadió el éter como quinto elemento para constituir los objetos celestes. En todos estos estudios, subyace la idea de que si la materia fuese indivisible infinitamente se llegaría a la no-existencia, por lo que parece más plausible disponer de unos pequeños ladrillos básicos e indivisibles, los átomos, con los que construir todo lo que vemos.



Empédocles por Luca Signorelli, Capilla de San Brizio. Orvieto

El estudio de la gravitación por Galileo y después por Newton dio claves importantes sobre la acción de las fuerzas a distancia y la noción de campo que conlleva. En particular, el concepto de 'campo' físico, que permite asociar una magnitud física a una determinada región del espacio, se extendió muy substancialmente posibilitando niveles de abstracción más altos y, por tanto, mayor generalidad en el tratamiento de los procesos físicos.

Pero estos estudios sobre la acción a distancia entre partículas y graves no tuvo gran incidencia en la comprensión de la estructura íntima de la materia, que no daría un paso adelante fundamental hasta que el físico británico J.J. Thomson (Premio Nobel de Física en 1906) descubrió el electrón en 1897. En sus experi-

mentos, Thomson demostró que los rayos catódicos estaban constituidos por esas partículas que no habían sido detectadas antes y que tenían una masa que no alcanzaba a la milésima parte del ion hidrógeno. La carga del electrón fue medida por Millikan en 1909 mediante su experimento de la gota de aceite, sin duda uno de los más bellos de la historia de la física. Por este y otros trabajos, Millikan recibió el Premio Nobel en 1923.

El neozelandés Ernest Rutherford descubrió el núcleo atómico en 1911 mientras trabajaba en la Universidad de Manchester, lo que le llevó a elaborar el primer modelo atómico: un modelo ‘planetario’ en el que toda la carga positiva y un altísimo porcentaje de la masa deben estar confinadas en el pequeño núcleo, mientras que los electrones, portadores de la carga negativa se mueven en su entorno. Rutherford, también fue Premio Nobel: fue distinguido en 1908 con el de química, lo que le ocasionó una cierta aflicción, pues él se consideraba ante todo físico y tenía a la física como la mayor de las ciencias. Según su famosa expresión: “La ciencia o es física, o es coleccionar sellos”.

El desarrollo de la mecánica cuántica al principio de los años 1920 cambió radicalmente nuestra imagen del electrón. Lejos de ser una simple y pequeña ‘bolita’, el electrón poseía características insospechadas. Sobre todo, poseía un carácter dual onda-partícula, lo que imponía una descripción mediante una función de ondas deslocalizada. Para explicar algunas características de los espectros atómicos, hacia 1925 emergió una nueva propiedad del electrón: el espín, una especie de momento angular intrínseco que se comporta de manera muy diferente al momento angular de la física clásica. De hecho, se piensa hoy que imaginar el espín como una rotación de la partícula no es más que una metáfora visual para tratar de hacer intuitiva esta propiedad mecanocuántico-relativista, que no tiene nada de intuitivo.

El austríaco Wolfgang Pauli enunció su sorprendente principio de exclusión en 1925 (por el que mereció el Nobel en 1935), según esta norma es imposible que dos electrones –en un átomo– puedan tener la misma energía, el mismo lugar, e idénticos números cuánticos. Poco después, Paul Dirac (Premio Nobel de Física en 1933) desarrolló una ecuación relativista, la conocida como ‘ecuación de Dirac’ que describe al electrón con su espín. Pero lo más fascinante de esta ecuación es que admitía una solución adicional para una partícula similar al electrón pero con carga positiva. Dirac predijo así la existencia del positrón (que sería encontrado en los rayos cósmicos por Carl Anderson en 1932), enunció las primeras ideas sobre

la antimateria, y realizó una formulación del vacío como un mar (el 'mar de Dirac') que debía estar lleno de partículas con energía negativa.

Poco después de 1932, cuando James Chadwick (Nobel en 1935) descubrió el neutrón, se disponía de todos los ingredientes necesarios para formar la materia. Todos los átomos de todos los elementos de la tabla periódica estaban constituidos por protones, neutrones y electrones; y la masa parecía no tener misterios, sino que se nos presentaba como una propiedad natural de esas partículas elementales. Sin embargo, se sabía que la masa no es indestructible, pues Einstein en 1905 ya había anunciado que masa y energía son intercambiables según la fórmula física más famosa del mundo: $E = mc^2$. La masa podía ser considerada como una reserva poderosísima de energía, algo que tendría unas consecuencias terribles cuando, 60 años más tarde, se llevaron a la práctica estas ideas teóricas para construir la bomba atómica.

También se sabía que, al menos, algunas de estas partículas no eran completamente estables. Por ejemplo, los experimentos de Rutherford sobre la radioactividad beta había que explicarlos mediante la desintegración de un neutrón en un protón y un electrón, y la falta de energía que se observaba en este proceso fue explicada en 1930 por Pauli mediante la introducción del neutrino (que no se detectaría hasta 1956).

Feynman, Schwinger y Tomonaga (quienes recibieron el Nobel en 1965) pondrían en orden todas las ideas existentes en 1948 mediante el desarrollo de una nueva teoría: la electrodinámica cuántica. Las fuerzas de atracción y repulsión entre partículas se transmitían por otras partículas que iban asociados a los campos correspondientes. Si el fotón era la partícula mediadora de la interacción electromagnética, tenía que haber otras partículas mediadoras capaces de mediar en la interacción nuclear fuerte (responsable de las fuerzas que mantienen unidos los núcleos atómicos) y en la interacción débil (responsable de la desintegración beta).

Entre tanto, el número de partículas elementales descubiertas no dejaba de crecer. Al descubrimiento del mesón mu en 1936 realizado por Anderson en los rayos cósmicos, siguió el del mesón pi y el de los kaones K^+ , K^- y Λ^0 . Los grandes desarrollos experimentales de los años 1950 y, poco después, el nuevo acelerador europeo en Ginebra (CERN) y el estadounidense en Brookhaven, que entraron en funcionamiento en 1959-1960, pusieron de manifiesto toda una plétora de partículas.

A principios de los 1960, Sheldon Glashow (Nobel en 1979) unificó en una única teoría la descripción de la interacción electromagnética y la de la débil y, como una consecuencia natural, las partículas mediadoras de la interacción débil (designadas por W^+ , W^- y Z^0) debían poseer masa, estableciendo así una diferencia muy sustancial con la interacción electromagnética, cuya partícula mediadora (el fotón) no tenía masa.

Por su parte, Murray Gell-Mann (Nobel en 1969) se encontraba estudiando la interacción nuclear fuerte y acuñó el término 'extrañeza' para describir una propiedad fundamental de las partículas, un nuevo número cuántico, que debía conservarse en la descomposición de las partículas en reacciones fuertes y electromagnéticas que ocurren en un corto período. La teoría de Gell-Mann aportó orden al caos existente cuando ya se conocían cerca de 100 partículas elementales. En 1964, Gell-Mann hizo la hipótesis de que todas las partículas conocidas (salvo los leptones y el fotón) estaban formadas por otras partículas más elementales llamadas quarks. Los quarks se mantendrían unidos gracias al intercambio de gluones. Junto con otros investigadores se construyó así la teoría cuántica de quarks y gluones, llamada hoy cromodinámica cuántica.



Murray Gell-Mann, Joi

Así pues, durante el largo camino recorrido por el conocimiento desde Empédocles a Gell-Mann, el 'átomo' de Demócrito sufrió una radical transformación pues, según las ideas actuales, se parecería mucho más a un quark que a un átomo en sentido moderno. Aunque la moderna teoría de partículas sea también atomista, lo que hoy llamamos átomo nos aparece como una entidad sumamente compleja que no tiene nada de indivisible. Veremos que, de hecho, los 'átomos' que imaginaron los griegos se corresponden con los quarks y los leptones; mientras que las fuerzas que mantienen

aglomerada la materia, el Amor y el Odio de Empédocles, se han convertido hoy en otras de nombres mucho menos poéticos: las fuerzas gravitatoria, electromagnética, nuclear débil y nuclear fuerte.

■ Conservación y simetría

Emmy Noether fue una mujer absolutamente excepcional. Nacida en Baviera en 1882, de padre matemático, Emmy estudió idiomas y pudo dedicarse a su enseñanza. Pero en lugar de ello, tomó una decisión muy difícil para una mujer en su época: estudiar ciencias exactas, disciplina en la que obtuvo un doctorado en 1907. Durante los 7 años siguientes impartió clases en la Universidad de Erlangen sin recibir ninguna remuneración, pues prácticamente no había oportunidades allí para una mujer intentando dedicarse a una disciplina considerada exclusivamente masculina en la Alemania de la época.



Emmy Noether

Noether envió sus trabajos a David Hilbert, en la Universidad de Gotinga y este último, impresionado por la labor de la mujer, la invitó a reunirse con él en 1915. Pero para obtener un puesto en Gotinga, Noether se encontró con toda la resistencia de la inmensa mayoría del claustro. “¿Qué pensarán nuestros soldados cuando vuelvan a la universidad y encuentren que se les pide que aprendan poniéndose a los pies de una mujer?” argumentaban. Pero el gran Hilbert respondió indignado “No veo porqué el sexo de un candidato pueda ser un argumento en contra de su admisión como *privatdozent*. Después de todo, somos una universidad, no un establecimiento de baños” y, afortunadamente, consiguió el puesto para Noether. Con el tiempo Noether, sería considerada la mujer más importante de la historia de las matemáticas por David Hilbert y por el propio Albert Einstein.

Emmy Noether revolucionó el álgebra de anillos y cuerpos. Pero su mayor contribución en el contexto que nos ocupa en este artículo fue la enunciación, en 1915, del teorema que lleva su nombre y que describe la conexión fundamental que existe entre las leyes de conservación de las magnitudes físicas y la simetría de las leyes de la física. Según el teorema de Noether, la conservación de magnitudes como el momento y la energía puede deducirse a partir del comportamiento de las leyes que las describen ante operaciones de ciertas transformaciones continuas de simetría.

A menudo pensamos en operaciones de simetría de tipo discreto (como la reflexión especular), pero en física también se utiliza el concepto de simetría conti-

nua, por ejemplo una traslación espacial o temporal (que puede ser realizada mediante un desplazamiento continuo en el espacio o en el tiempo), o una rotación (que puede ser realizada variando el ángulo de manera continua). Por ejemplo, el hecho de que las leyes de la física sean simétricas respecto del tiempo implica la conservación de la energía.

El matemático alemán Hermann Weyl estudió de manera concienzuda el teorema de Noether mientras trabajaba sobre la teoría de grupos de transformaciones simétricas continuas denominados grupos de Lie (en honor del matemático noruego que los describió en el siglo XIX). En 1918, Weyl concluyó que las leyes de conservación están íntimamente relacionadas con transformaciones *locales* de simetría a las que asignó el término genérico de ‘simetrías gauge’. Este término, tan críptico como poco afortunado, le fue sugerido a Weyl mientras pensaba en las simetrías entre diferentes puntos del espacio-tiempo, como en el ejemplo del tren que va desplazándose sobre raíles que están espaciados por un ancho (‘gauge’ en inglés) que se mantiene constante, reflejando el hecho de que el factor de escala se mantiene invariable en la transformación.

El desarrollo de la mecánica ondulatoria de Schrödinger permitió hacer una conexión con el grupo de Lie $U(1)$, que describe transformaciones de simetría totalmente análogas a la rotación, pero en el plano complejo. De la simetría de la función de ondas de un electrón respecto del grupo $U(1)$ puede deducirse la ley de conservación de la carga. Se dice que el electromagnetismo es una teoría $U(1)$.

La teoría cuántica de la interacción fuerte, desarrollada por Cheng-Ning Yang (Premio Nobel, 1957) y Robert Mills en 1954, se basó en la conservación de una nueva magnitud física, el isospín (o espín isotópico), que conllevaba una simetría de tipo $SU(2)$ en las ecuaciones que describían el neutrón y el protón. Una modificación de esta teoría realizada por Sheldon Glashow (Nobel en 1979), permitió en 1961 unificar en una única teoría la descripción de la interacción electromagnética y la de la débil. Las leyes de esta teoría obedecían a una simetría del tipo $SU(2) \times U(1)$. Simultáneamente, en sus estudios de la interacción fuerte, Gell-Mann estaba introduciendo el grupo de simetrías $SU(3)$ para clasificar todas las partículas estables bajo la influencia de la interacción fuerte.

■ El Modelo Estándar

A falta de una teoría del todo que reduzca el comportamiento de la materia y de la energía a unos pocos principios muy básicos, el Modelo Estándar es la teoría considerada hoy más completa y aceptada que cumple con tal cometido aunque considere un conjunto de leyes no bien unificadas. El Modelo Estándar está compuesto de la teoría electrodébil y la cromodinámica cuántica. Como hemos visto más arriba, la primera, describe las interacciones electromagnética y débil en un conjunto de ecuaciones unificado, mientras que la cromodinámica describe el comportamiento de los quarks. El aparato matemático mediante el que se expresa el Modelo Estándar ha venido a denominarse teoría cuántica de campos.

Para simplificar, podemos dividir los conceptos principales del Modelo Estándar en tres partes: (1) partículas de materia, (2) partículas mediadoras de las interacciones y (3) bosón de Higgs.

1. Partículas de materia

La materia está constituida por 12 partículas fundamentales, todas ellas fermiones de espín $\frac{1}{2}$. Estas partículas son 6 leptones y 6 quarks. Los fermiones siguen el principio de exclusión de Pauli: no puede haber dos partículas iguales con un estado igual de espín. Esto es lo que confiere a la materia su característica impenetrabilidad.

Los 6 leptones son tres de tipo 'down': el electrón, el muón y el tau y tres de tipo 'up': neutrinos, cada uno de ellos asociado con uno de los tres primeros leptones.

Tres generaciones de la materia (fermiones)

	I	II	III	
masa →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
carga →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
espín →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nombre →	u arriba	c encanto	t cima	γ fotón
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Quarks	d abajo	s extraño	b fondo	g gluón
	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e neutrino electrónico	ν_μ neutrino muónico	ν_τ neutrino tauónico	Z⁰ bosón Z
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	±1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Leptones	e electrón	μ muón	τ tauón	W[±] bosón W
				Bosones de gauge

Partículas elementales del Modelo Estándar

Los 6 quarks fundamentales también se pueden agrupar en dos tríos: uno de tipo 'up': *up*, *top* y *charm*; y tres de tipo 'down': *down*, *bottom* y *strange*; es decir: arriba, culmen y encanto; y abajo, fondo y extraño.

Cada una de estas partículas tiene algunas propiedades bien definidas y que resultan de los principios generales del Modelo Estándar: los leptones de tipo down tienen carga electromagnética -1 , mientras que los de tipo 'up' tienen carga electromagnética 0 . Los quarks tipo up (*up*, *top* o *charm*) llevan una carga eléctrica de $+2/3$, y los tipo down (*down*, *strange* y *bottom*) llevan una carga eléctrica de $-1/3$.

De manera similar a como la interacción electromagnética se describe con la ayuda de la carga eléctrica, la interacción fuerte entre los quarks se describe mediante tres cargas de color, que son denominadas, por simple conveniencia, roja, verde y azul. Los leptones no tienen carga de color y no están sometidos a la interacción fuerte.

Leptones y quarks están sometidos a la interacción nuclear débil, que se describe mediante varias cargas de 'sabor', incluyendo al isospín débil, que es la más conocida.

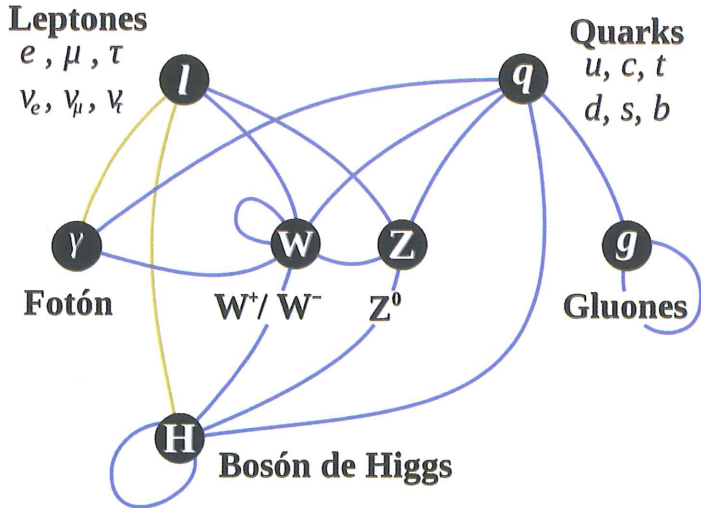
Estas 12 partículas elementales, en cada grupo, también pueden agruparse por parejas o 'familias'. Por ejemplo: cada quark tipo up con su correspondiente quark tipo down, y cada leptón tipo down con su neutrino correspondiente. Las diferencias entre los dos miembros de cada una de estas 6 familias son la masa, la carga y el sabor.

Un problema inicial de este Modelo Estándar es que las masas de las partículas no surgen de manera natural de las ecuaciones fundamentales y debía ser introducida 'ad hoc'. Esta deficiencia fue resuelta mediante la inclusión en la teoría de un hipotético campo de Higgs.

2. Partículas mediadoras de las interacciones

Todas las partículas elementales están sometidas a interacciones: gravitatoria, electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil. En el Modelo Estándar estas interacciones suceden mediante el intercambio de otras partículas que son denominadas 'mediadoras'. Al igual que las partículas elementales de la materia,

las partículas mediadoras también poseen espín, pero todas estas tienen espín entero, por lo que son denominadas bosones (en contraste con los fermiones que están definidos por un espín fraccionario). Los bosones son los siguientes:



Interacciones entre partículas elementales

El fotón: mediador de la interacción electromagnética. No posee masa. Su interacción con la materia está descrita mediante la electrodinámica cuántica.

Los bosones de gauge W^+ , W^- y Z^0 : median las interacciones nucleares débiles entre quarks y leptones. Son masivos, con el Z^0 más masivo que W^+ y W^- . Además, W^+ y W^- llevan una carga eléctrica de $+1$ y -1 y participan en las interacciones electromagnéticas, mientras que Z^0 es eléctricamente neutro. Estos tres bosones gauge junto con los fotones median colectivamente las interacciones electrodébiles.

Ocho gluones: median las interacciones nucleares fuertes entre las partículas cargadas con color (los quarks). Los gluones no tienen masa. La multiplicidad de los gluones se etiqueta por las combinaciones del color y de una carga de anti-color. Como el gluon tiene una carga efectiva de color, pueden interactuar entre sí mismos. Los gluones y sus interacciones se describen mediante la teoría de la cromodinámica cuántica.

Como vimos más arriba, cada interacción va asociada con una ley de conservación de carga y cada ley de conservación de la física siempre lleva asociada una

invariancia de la ley respecto de transformaciones de simetría gauge por grupos de Lie. Las interacciones electromagnética, débil y fuerte, van asociados a los grupos de Lie $U(1)$, $SU(2)$ y $SU(3)$, respectivamente.

Las propiedades de las tres interacciones quedan resumidas en la siguiente tabla:

Interacción	Grupo gauge	Bosón mediador	Símbolo	Fuerza relativa
Electromagnética	$U(1)$	fotón	γ	$a_{em} = 1/137$
Débil	$SU(2)$	bosones intermedios	W^\pm, Z^0	$a_{weak} = 1,02 \cdot 10^{-5}$
Fuerte	$SU(3)$	gluones (8 tipos)	g	$a_s(M_z) = 0,121$

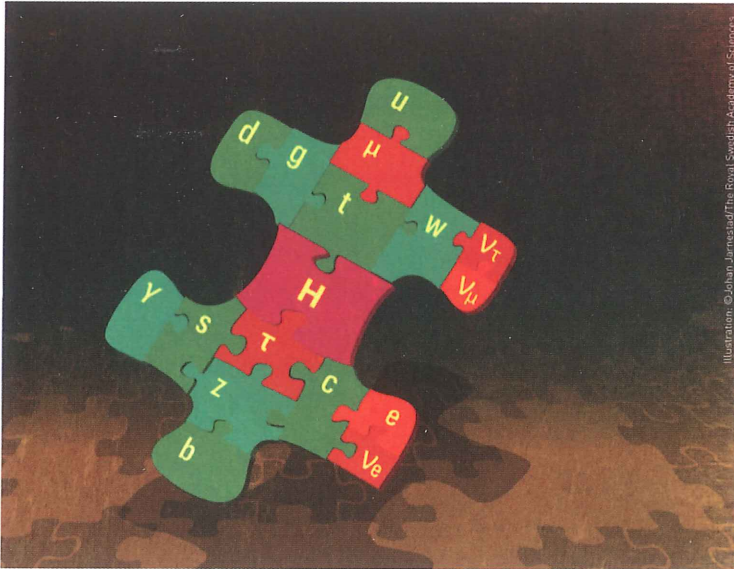
■ El bosón de Higgs

Predicción

En la década de 1960, cuando el Modelo Estándar descrito más arriba aún se estaba desarrollando, se observaba una contradicción aparente entre dos fenómenos. Por un lado, la fuerza nuclear débil entre partículas subatómicas podía explicarse mediante leyes similares a las del electromagnetismo (en su versión cuántica). Dichas leyes implican que las partículas que actúen como intermediarias de la interacción, como el fotón en el caso del electromagnetismo y las partículas W^\pm y Z^0 en el caso de la fuerza débil, deben ser no masivas. Sin embargo, sobre la base de los datos experimentales, los bosones W^\pm y Z^0 , que entonces solo eran una hipótesis, debían ser masivos. Entre otras cosas, de esta manera se conseguía el corto alcance de tales interacciones nucleares.

Para resolver esta contradicción aparente se ideó un proceso mediante el cual los bosones vectoriales pueden obtener masa sin romper explícitamente la invariancia de gauge. La primera propuesta de este mecanismo de ruptura espontánea de la simetría fue realizada en 1962 por Philip W. Anderson. En 1964, tres grupos de físicos publicaron de manera independiente el desarrollo de esta solución, que reconciliaba dichas leyes con la presencia de la masa. Esta solución, denominada posteriormente mecanismo de Higgs, explica la masa como el resultado de la interacción de las partículas con un campo que permea el vacío, denominado

campo de Higgs, en honor de Peter Higgs que fue en solitario uno de los proponentes de dicho mecanismo. En su versión más sencilla, este mecanismo implica que debe existir una nueva partícula asociada con las vibraciones de dicho campo: el bosón de Higgs.



El bosón de Higgs completa el puzle del Modelo Estándar, Fundación Nobel

Mediante el mecanismo de Higgs, un campo de naturaleza escalar (su correspondiente bosón tiene espín cero) permea el vacío, donde adquiere un valor no nulo, y hace posible que la simetría de las leyes de la física se ‘rompa’ de manera espontánea determinando así las propiedades de las partículas elementales. Según esta teoría, las propiedades de las partículas elementales ya no son ‘intrínsecas’ sino que dependen de la evolución y del entorno, pues en principio la simetría podría romperse de maneras diferentes, dependiendo de la densidad y de la temperatura.

Dado que este mecanismo fue propuesto de manera simultánea por tres equipos diferentes: Robert Brout y François Englert; Peter Higgs; y Gerald Guralnik, C. R. Hagen y Tom Kibble, parecería más adecuado denominar a este mecanismo ‘mecanismo de Englert–Brout–Higgs–Guralnik–Hagen–Kibble’, o mecanismo EBHGHK. De hecho los tres artículos fueron reconocidos como un único hito en la historia de la física cuando se celebró el 50 aniversario de la revista Physical Review Letters y sus seis autores fueron galardonados con el Premio Sakurai, el

más alto galardón en física de partículas. Sin embargo, por simplicidad sin duda, el término ‘mecanismo de Higgs’ ha sido el que ha pasado a la historia. Pero ha influido también que fue Peter Higgs quien más se focalizó en el estudio del mecanismo y en 1966 escribió un nuevo artículo en el que describía el mecanismo del decaimiento del bosón, sugiriendo así que el mecanismo podía ser puesto de manifiesto en la práctica midiendo los productos de la desintegración de esta partícula. Así pues, mientras que en el artículo de Guralnik, Hagen y Kibble, el bosón no tiene masa; el bosón debía ser masivo según Higgs.

Con la predicción de la existencia del bosón de Higgs y su capacidad para dotar de masa a las partículas, todo el Modelo Estándar de la física de partículas pasó a reposar enteramente sobre este bosón. Sin el bosón de Higgs, electrones y quarks carecerían de masa y serían similares al fotón, viajarían a la velocidad de la luz, y serían incapaces de formar átomos y moléculas, el Modelo Estándar se derrumbaría como un castillo de naipes y el mundo que conocemos no podría existir.

¿Partícula de Dios?

El bosón de Higgs también se conoce como la “partícula de Dios” o “partícula divina”. Esta denominación se atribuye habitualmente al físico estadounidense Leon Lederman quien recibió el Premio Nobel en 1988 por sus trabajos sobre los neutrinos. Entre 1979 y 1989, Lederman dirigió el Fermilab, laboratorio de física de partículas que albergó un gran acelerador de hadrones: el Tevatrón. En 1993 Lederman escribió un libro de divulgación científica que llegó a ser muy popular, su título en EE.UU. fue “The God Particle: If the Universe Is the Answer, What Is the Question?” Según explica en el propio libro, Lederman acuñó el apodo ‘God particle’ para el bosón de Higgs porque la consideró “central para la física de hoy en día, crucial para nuestra comprensión de la estructura de la materia, sin embargo muy evasiva”, pero en tono un tanto humorístico añade que otra razón fue porque “la editorial no les dejó llamarla ‘the god damn particle’ (‘la maldita partícula’) aunque ese fuese un título mucho más apropiado, dada su naturaleza ‘villana’ y el costo que estaba causando su localización.

En todo caso, la traducción al español de ‘God particle’ por ‘partícula de Dios’ nos parece muy poco afortunado, quizás fuese más apropiado ‘la partícula diosa’, pues más que dar un carácter ‘divino’ o religioso a la partícula, Lederman tan solo pretendía destacar su papel primordial en el Modelo Estándar. El propio Higgs ha

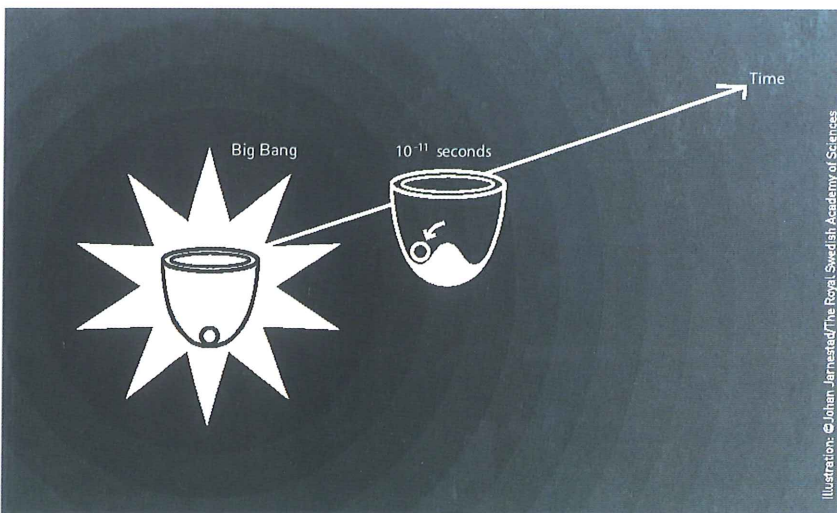
afirmado que no le agrada que a la partícula que lleva su nombre se la conozca también como la 'partícula de Dios'. En lo sucesivo evitaremos pues esta denominación y nos referiremos a esta partícula como 'bosón de Higgs', o simplemente 'el Higgs'.

El campo de Higgs y la simetría del Universo

Ya vimos cómo, según el teorema de Noether, las leyes de conservación de la física (como, por ejemplo, la conservación del momento, de la energía y de la carga) tienen su origen en la simetría de las ecuaciones que describen los sistemas físicos.

Muy probablemente nuestro Universo nació simétrico. En el momento del Big Bang, las partículas no tenían masa y todas las fuerzas estaban unificadas en una única fuerza primordial. Sin embargo, este orden primordial se perdió unos 10^{-11} segundos después del Big Bang, cuando el campo de Higgs perdió su equilibrio original. ¿Qué fue lo que originó esta pérdida de simetría?

El estado energético que describe a nuestro Universo en el momento del Big Bang puede ser imaginado como una bola en el fondo de un pozo de potencial simétrico. Si la bola sufre una perturbación y se mueve de su sitio, regresa a la posición del mínimo.



Ruptura de simetría en el campo de Higgs tras el Big Bang, Fundación Nobel

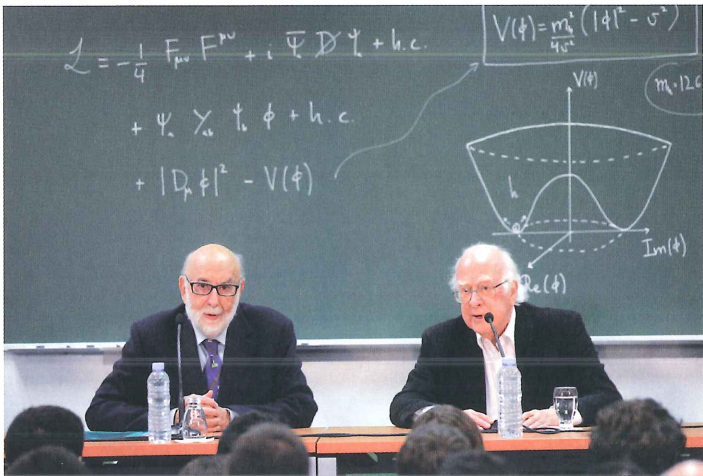
Imaginemos ahora que surge una prominencia en la posición del fondo del pozo dando lugar a una configuración similar a la de un sombrero mexicano. La bola, situada en la cúspide de la prominencia, mantendrá la simetría pero se encontrará en una situación inestable, caerá entonces por cualquier punto de la ladera y desde su posición, descentrada, la simetría aunque aún existe ya no será evidente. De manera similar, el campo de Higgs, unos 10^{-11} segundos después del Big Bang, rompió su simetría para alcanzar un nivel energético estable en el vacío que está desplazado respecto del nivel 'cero' de simetría.

Para que tenga lugar esta ruptura espontánea de la simetría, conocida como la transición de fase del campo de Higgs, se necesitaron cuatro partículas, pero solo una, la partícula de Higgs, ha sobrevivido. Las otras tres, denominadas W^+ , W^- , y Z^0 , fueron empleadas en la mediación de la fuerza nuclear débil. De esta manera la simetría de la interacción electrodébil fue salvaguardada.

Propiedades del bosón de Higgs

La descripción de la constitución de la materia mediante el Modelo Estándar se fundamenta en la existencia del campo de Higgs y en su bosón asociado. Por ello ya en los años 1960 se concluyó que resultaba imprescindible caracterizar al bosón de Higgs y tratar de detectarlo experimentalmente. En trabajos sucesivos al postulado de su existencia, se fueron afinando las propiedades que debía tener el bosón y se constató que muchas de sus propiedades, tal y como se describe en el Modelo Estándar, están totalmente determinadas.

Como su nombre indica, la partícula de Higgs un bosón, tiene espín 0 (lo que se denomina un bosón es-



Englert y Higgs en la Universidad de Oviedo, Fundación Príncipe de Asturias

calar). No posee carga eléctrica ni carga de color, por lo que no interacciona con el fotón ni con los gluones. Sin embargo interacciona con todas las partículas del modelo que poseen masa: los quarks, los leptones cargados y los bosones W y Z de la interacción débil. Sus constantes de acoplo, que miden cuán intensa es cada una de esas interacciones, son conocidas: su valor es mayor cuanto mayor es la masa de la partícula correspondiente. En la versión original del modelo estándar, no se incluía la masa de los neutrinos ni, por tanto, una interacción entre estos y el Higgs. Aunque esta podría explicar la masa de los neutrinos, en principio su origen puede tener una naturaleza distinta. El bosón de Higgs es además su propia antipartícula.

El Modelo Estándar no predice sin embargo la masa del Higgs, que ha de ser medida experimentalmente; tampoco el valor de algunos parámetros que dependen de esta: las constantes de acoplo del Higgs consigo mismo –que miden cuán intensamente interaccionan dos bosones de Higgs entre sí– o su vida media. En primera aproximación, la masa del Higgs podría pues tomar cualquier valor.

Con el mecanismo de Higgs, el modelo estándar de la física de partículas quedó finalmente constituido. En particular, todas las partículas masivas que lo forman interaccionan con este campo, y reciben su masa de él. Sin embargo, quedaba por probar que el mecanismo de Higgs era real y no una mera entelequia teórica. Para ello había que detectar el bosón de Higgs. Para ello, el primer requisito era tener una idea de su masa. Aunque el Modelo Estándar no la predice, la consistencia matemática impone cotas inferiores entre 85 y 130 GeV/c^2 , y cotas superiores entre 140 y 650 GeV/c^2 . Tenemos pues indicios de que el bosón de Higgs debe de ser bastante masivo (unas cientos de veces la masa del protón) y allá por los 1970-1980 no existía ningún experimento de física de partículas capaz de generar bosones tan masivos.

■ A la caza del bosón de Higgs

Búsquedas previas al LHC

El CERN, la Organización Europea para la Investigación Nuclear, se constituyó en 1954, pocos años tras la finalización de la Segunda Guerra Mundial, con el objetivo tanto de impulsar la investigación en Europa como de estrechar las relaciones entre los países del continente. Hoy el CERN tiene 20 países miem-

bros (ver Apéndice) pero mantiene colaboraciones con un centenar de países del mundo.

Desde su creación, el CERN construyó diversos aceleradores de partículas, pero el primero que fue muy relevante en la caza del Higgs fue el Gran Colisionador de Electrones y Positrones (LEP): un anillo de 27 kilómetros en la frontera franco-suiza. El LEP fue puesto en operación en 1989 trabajando en energías próximas a 90 GeV con el fin de observar el decaimiento del bosón Z^0 (tanto el bosón Z^0 como los W^+ y W^- , los mediadores de la interacción débil, habían sido descubiertos experimentalmente en el CERN en 1983). El Z^0 , producido mediante la colisión de un electrón con un positrón, debía decaer en un Higgs que, a su vez, se desintegraría en una pareja de quarks y otra de neutrinos. Durante la primera fase del LEP, se estableció un límite inferior para la masa del bosón de Higgs de $63,9 \text{ GeV}/c^2$ (con un nivel de confianza del 95%).

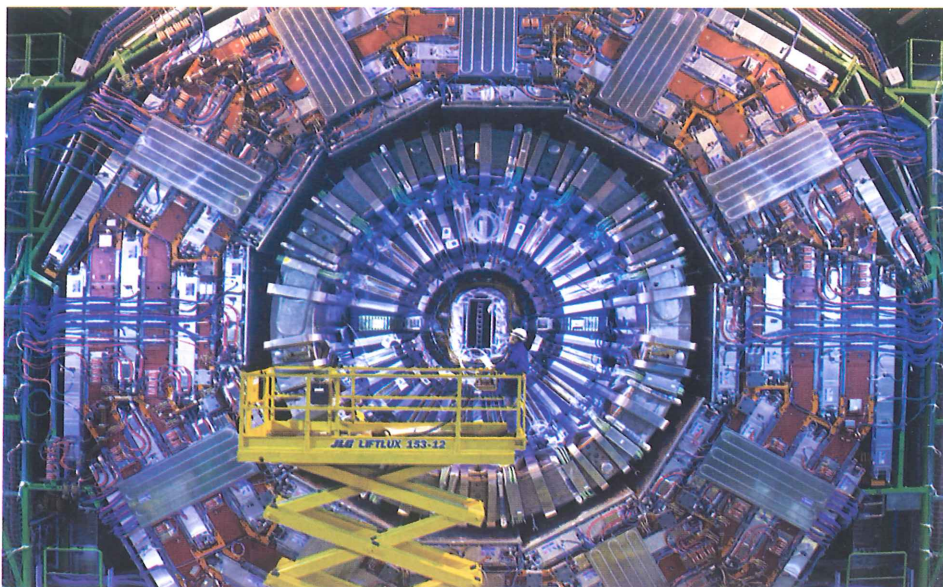
EN 1995, el LEP fue modificado para poder trabajar en torno a los 130 GeV y, a continuación, fue incrementándose su energía de trabajo hasta los 209 GeV en el año 2000, cuando el colisionador fue desmantelado para construir otro mucho más potente. Combinando todos los resultados del LEP, se estableció en el año 2003 un nuevo límite inferior para la masa del bosón de Higgs: $114,4 \text{ GeV}/c^2$ (con un nivel de confianza del 95%).

En paralelo con los experimentos del CERN, los Estados Unidos estaban trabajando primero con el Colisionador Lineal SLAC (SLC), en Stanford, y más tarde con el Tevatrón (un colisionador protón-antiprotón) en el Fermilab, estableciendo una cota superior para la masa del bosón de Higgs en $152 \text{ GeV}/c^2$. De esta manera, el rango permitido de masas quedó establecido en $114\text{-}152 \text{ GeV}/c^2$.

Búsqueda con el LHC

Durante dos congresos que tuvieron lugar en Suiza en 1984 (poco después del descubrimiento de los bosones W y Z) se concluyó que el siguiente paso importante en la investigación experimental de la física de partículas era la construcción de un colisionador que trabajase en torno al TeV. La tecnología disponible en la época reposaba sobre las colisiones entre hadrones. Por ejemplo, la colisión de protones y antiprotones había sido utilizada en el Tevatrón del Fermilab (EE.UU.). Europa decidió entonces construir el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) en el túnel del

LEP en el CERN. Mientras, los EE.UU. decidieron competir construyendo una máquina más potente: el Super Colisionador Superconductor (SSC), un proyecto que tras empezar la obra civil en Texas, debió ser abandonado por sus elevados costes. Por su parte, el Tevatrón fue cerrado hace ahora un par de años.



El detector CMS del LHC durante su construcción en 2007, M. Brice, CERN

El LHC situó entonces a Europa en la vanguardia de la investigación de partículas. Además, al proyecto acabarían sumándose tanto EE.UU. como Japón, Canadá, Rusia e India, que realizaron contribuciones muy significativas a la construcción del acelerador.

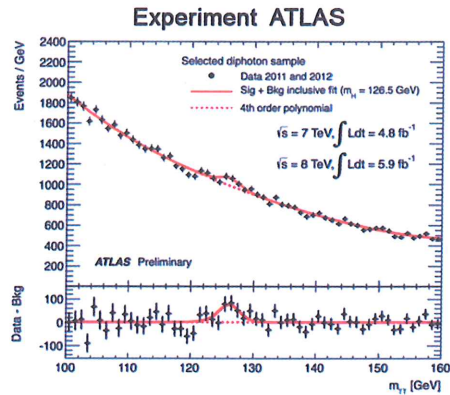
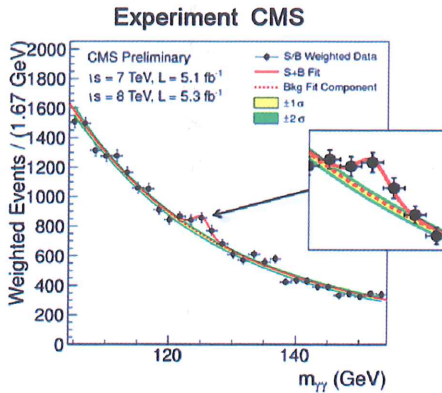
El LHC es sin duda una de las máquinas más complejas construidas por el hombre. Dos grupos de investigación, cada uno de ellos constituido por más de 3.000 científicos e ingenieros, han construido y se encuentran explotando ahora dos detectores colosales de partículas, ATLAS y CMS, que se encuentran a 100 metros bajo tierra. El LHC, que se construyó aprovechando el túnel de 27 kilómetros del LEP, es capaz de propiciar 40 millones de colisiones de partículas por segundo y de observar su resultado. Los protones se inyectan cada diez horas en dos haces ultra-finos que viajan en sentidos opuestos a una velocidad que es el 99,99999% de la velocidad de la luz. Actualmente la colisión tiene lugar en un rango de energías en torno a 8 TeV, lo que permite detectar nuevas partículas con masa por debajo del TeV.

La recopilación de datos y análisis en la busca de Higgs se intensificaron desde el 30 de marzo de 2010, cuando el LHC comenzó a operar en estos rangos de energía. Los primeros resultados de los experimentos ATLAS y CMS del LHC, entre 2010 y mediados de 2011 excluyeron un bosón de Higgs de modelo estándar en el rango de masa $155\text{-}190\text{ GeV}/c^2$ y $149\text{-}206\text{ GeV}/c^2$ (con un nivel de confianza del 95%).

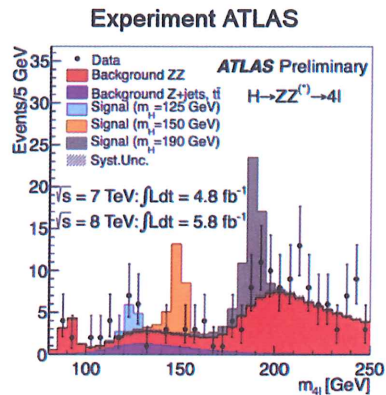
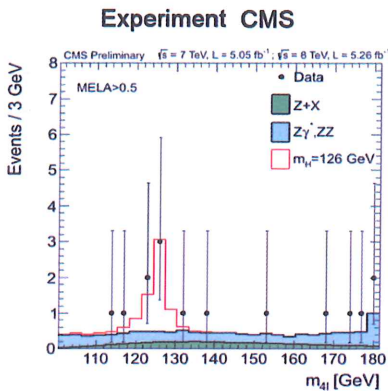
El descubrimiento

A partir de diciembre de 2011 la búsqueda se había estrechado aproximadamente a la región de $115\text{-}130\text{ GeV}/c^2$ con un enfoque específico alrededor de $125\text{ GeV}/c^2$, donde tanto el experimento del ATLAS y el CMS, independientemente, encontraron un exceso de eventos, aunque no completamente significativo desde el punto de vista estadístico. En efecto, estos datos, eran insuficientes para mostrar si tales excesos eran debidos a fluctuaciones de fondo (es decir, casualidad aleatoria u otras causas), y su significado estadístico no era lo suficientemente grande como para sacar conclusiones, ni para contar como una observación formal, pero el hecho de que dos experimentos independientes mostrasen excesos alrededor de la misma masa condujo a la comunidad de la física de partículas a un razonable optimismo.

Finalmente, el 4 de julio de 2012, en el auditorio principal del CERN, completamente abarrotado por los propios trabajadores del instituto, medios de comunicación y público general, los portavoces de los experimentos ATLAS y CMS anunciaron el descubrimiento independiente, en ambos detectores, de una partícula de masa en el rango $125\text{-}126\text{ GeV}/c^2$. Más concretamente, el CMS anunció el descubrimiento de un bosón con masa $125,3 \pm 0.6\text{ GeV}/c^2$ con una relación señal a ruido de 4,9 sigma (desviación cuadrática media de las fluctuaciones de ruido), mientras que el ATLAS anunció su detección de un bosón con masa $126,5\text{ GeV}/c^2$ con una relación señal a ruido de 5,27 sigma. En ambos experimentos se habían detectado dos canales de desintegración: un canal mediante el que el Higgs se desintegra en dos fotones y otro de desintegración en 4 leptones (ver figuras adjuntas). En ambos casos, la nueva partícula tenía propiedades compatibles con las predichas para el bosón de Higgs. Entre la audiencia, como no podía ser de otra manera, se encontraban los Doctores Englert y Higgs.



Detección de la desintegración del Higgs en dos fotones, CERN



Detección de la desintegración del Higgs en cuatro leptones, CERN

■ Premio Príncipe de Asturias y Premio Nobel de Física 2013

Reunido en Oviedo el 29 de mayo de 2013, el Jurado del Premio Príncipe de Asturias de Investigación Científica y Técnica 2013, en el que participaba nuestro compañero académico el Doctor D. Juan Luis Arsuaga Ferreras, acordó por unanimidad conceder el Premio de Investigación Científica y Técnica 2013 de forma conjunta a los físicos Peter Higgs y François Englert, y a la institución internacional CERN, el Laboratorio Europeo de Física de Partículas, por la predicción teórica y detección experimental del Bosón de Higgs.

El Jurado declaraba que “los trabajos pioneros de Higgs, y de Englert y Brout (este último fallecido en el año 2011), establecieron en el año 1964 la base teórica de la existencia del llamado bosón de Higgs. Esta partícula completa el Mo-

bosón de Higgs del Modelo Estándar o uno de los bosones de Higgs que predicen las teorías supersimétricas. Se espera que los datos recopilados en el Gran Colisionador de Hadrones del CERN puedan confirmar totalmente el descubrimiento y afinar las propiedades del nuevo bosón en 2015, cuando se ponga en marcha el LHC con una mayor luminosidad.

No obstante, aunque crucial para redondear el Modelo Estándar, el bosón de Higgs no resuelve, por sí solo, todos los enigmas que aún esconde esta teoría. En muchos aspectos, la teoría incluye elementos que parecen ad-hoc, es decir, que no surgen de la teoría de manera autoconsistente. Por ejemplo, la masa del neutrino (medida experimentalmente) impone realizar correcciones y extensiones en el Modelo.

En general los valores de las masas de las partículas elementales y de las constantes de acoplamiento de las diferentes interacciones parecen bastante arbitrarios y tampoco se deducen de manera natural de la teoría. Esto requiere 19 constantes numéricas que parecen no tener relación entre ellas (7 u 8 más cuando se incluye en la teoría la masa del neutrino). Hemos visto que las partículas elementales se agrupan en tres familias o generaciones. En los leptones cargados, estas generaciones son electrón-muón-tau, por orden creciente de masa. En los neutrinos: el electrónico, el muónico y el de tipo tau. En los quarks de tipo up: el up, el charm y el top; y en los quarks de tipo down: el down, el strange y el bottom. El origen de esta estructura jerárquica es todo un misterio, como lo es el hecho de que el número de generaciones esté limitado a tres.

El Modelo Estándar no incluye la gravitación. El gravitón, la partícula mediadora de la interacción gravitatoria, no encuentra su lugar entre las partículas del Modelo y la actual teoría canónica de la gravitación, la relatividad general de Einstein, no tiene descripción dentro de la teoría cuántica de campos.

La materia oscura que aparece en el modelo estándar de cosmología, y cuya importancia en el universo está constatada observacionalmente, tampoco encuentra acomodo en el Modelo Estándar de la física de partículas y parece requerir algún tipo de partícula elemental desconocida.

Se podría pensar que la energía oscura, una componente sumamente importante del universo según se ha constatado experimentalmente, podría tener su origen en la energía del vacío predicha por el Modelo Estándar. Sin embargo, la

energía predicha para el vacío es 120 órdenes de magnitud mayor que la energía oscura, por lo que se ha llegado a mencionar que esta es ‘la peor predicción de la historia de la física’.

Finalmente, en la comparación del Modelo Estándar con el mundo real resulta sorprendente la predominancia de la materia sobre la antimateria en el universo. Se trata de una asimetría que no tiene explicación fácil si asumimos que el universo nació neutro y que las cargas de todos los tipos deben de conservarse en cada proceso.

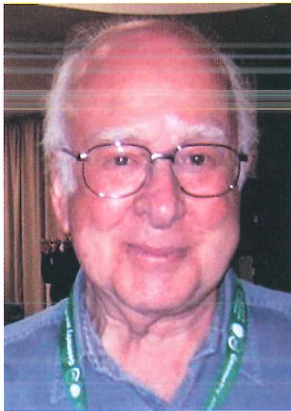
Como vemos, aún quedan muchos problemas que resolver y, por ello, surgió la idea de una teoría del todo como una super-teoría que fuese capaz de incluir todos los aspectos mencionados más arriba. Como ya he señalado en otras ocasiones, este término “teoría del todo” me resulta pretencioso y prefiero referirme con el de “nueva física” a los intentos que buscan unificar la gravitación con las otras tres interacciones (electromagnética, débil y fuerte).

No me cabe duda de que las pruebas experimentales de esta nueva física requerirán de medidas astronómicas, pues solo así pueden encontrarse los enormes campos gravitatorios (cerca de los agujeros negros) capaces de poner de manifiesto algunas de las predicciones más sutiles. Otras medidas requieren relojes de altísima precisión, y sin perturbaciones apreciables, en los que pueda medirse el comportamiento predicho por la relatividad general. Los niveles de energía por partícula que pueden observarse en el Universo primordial están muchos órdenes de magnitud por encima de los alcanzados actualmente en el CERN. Así pues, junto con las medidas en grandes aceleradores de partículas, la astronomía está llamada a jugar un papel fundamental en el desarrollo de la nueva física.

■ Biografías de los premiados

Peter W. Higgs

Peter W. Higgs (Newcastle upon Tyne, Reino Unido, 20 de mayo de 1929) estudió física en el King’s College de la Universidad de Londres, donde se doctoró en 1954. Ese año se trasladó a la Universidad de Edimburgo, donde inició su labor docente e investigadora y, salvo un paréntesis de cuatro años en Londres, desa-



Peter W. Higgs. (G.M. Greuel)

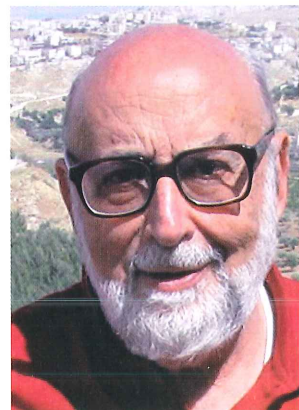
rolló toda su carrera, alcanzando la cátedra de Física Teórica en 1980. Desde 1996 es catedrático emérito de la Universidad de Edimburgo.

“Broken Symmetries, Massless Particles and Gauge Fields”, publicado en septiembre de 1964 en *Physics Letters*, y “Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons”, un mes después en *Physical Review Letters*, son los artículos en los que Higgs expuso su teoría sobre la existencia del bosón escalar.

Miembro de la Royal Society de Edimburgo, de la Royal Society de Londres y honorífico de la Royal Scottish Society of Arts y de la Saltire Society, Peter W. Higgs ha recibido grados honorarios de las universidades de Bristol, Edimburgo, Glasgow, Swansea, Cambridge, Heriot-Watt, del King’s College de Londres y del University College de Londres. Higgs ha recibido numerosos reconocimientos por sus aportaciones a la física, entre los que destacan el High Energy and Particle Physics Prize, que le concedió junto a Brout y Englert la Sociedad Europea de Física en 1997; el Wolf Prize de Física, compartido con Brout y Englert (Israel, 2004); el Sakurai Prize de la Sociedad Física Americana, compartido con Brout, Englert, Guralnik, Hagen y Kibble (2010); el Premio Nonino (Italia, 2013) y la Medalla Edimburgo del Festival Internacional de Ciencia de la capital escocesa, compartido con el CERN (2013).

François Englert

François Englert (Bélgica, 6 de noviembre de 1932) se licenció en Ciencias Físicas en la Universidad Libre de Bruselas en 1958 y se doctoró al año siguiente. Investigador asociado (1959-1960) y profesor asistente (1960-1961) en la Universidad de Cornell (EE.UU.), en 1961 empezó a enseñar en la Universidad Libre de Bruselas, donde también dirigió con Robert Brout el Grupo de Física Teórica desde 1980 y donde, desde 1998, es catedrático emérito.



François Englert. (Pnicolet)

En agosto de 1964 publicó con Robert Brout el artículo “Broken symmetry and themass of gauge vector mesons”, en el que teorizaban el mecanismo de ruptura de simetría que implicaba la presencia de la partícula fundamental o bosón escalar.

Doctor honoris causa por las universidades de Mons-Hainaut (Bélgica) y la VUB, entre otros reconocimientos académicos, Englert ha recibido, además de los galardones compartidos ya mencionados, el Premio Wetrems de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Real Academia de Bélgica, el First Award of the Gravity Research Foundation en 1978 (con Brout y Gunzig) y el Premio Francqui de Ciencias Exactas (Bélgica, 1982).

■ Apéndice 1. La organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN)

La Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN) –conserva las siglas en francés del Centro Europeo para la Investigación Nuclear que le precedió– es una organización internacional e intergubernamental, con sede en Ginebra (Suiza) y constituida por veinte Estados miembros: Alemania, Austria, Bélgica, Bulgaria, República Checa, Dinamarca, Eslovaquia, España, Finlandia, Francia, Grecia, Holanda, Hungría, Italia, Noruega, Polonia, Portugal, Reino Unido, Suecia y Suiza. Además, otros países participan en sus trabajos y altas instituciones, como la Comisión Europea y la UNESCO, poseen el estatus de observadores. Inaugurado en 1954, en la actualidad, emplea a unas 2.500 personas, científicos y técnicos de laboratorio, y en sus proyectos participan alrededor de 8.000 científicos de 85 nacionalidades procedentes de 580 universidades.



Logotipo del CERN

El 30 de marzo de 2010 científicos del CERN lograron el que entonces se consideró el mayor experimento científico del mundo: la colisión, por primera vez, de haces de protones previamente acelerados hasta obtener una energía de 7 teraelectronvoltios (TeV), en el interior del LHC, recreando condiciones similares a las que había cuando se originó el Big Bang. La creación de la primera partícula

de antimateria en el LHC supuso la confirmación de teorías físicas con las que se trabaja actualmente, como la Teoría de la Relatividad de Einstein y la comprensión de la formación del Universo. Estos hallazgos han permitido demostrar, en 2012, tras medio siglo de conjeturas, la existencia del denominado bosón de Higgs o “partícula de Dios”, además de completar el Modelo Estándar de la física de partículas –la tabla periódica del mundo subatómico y sus reglas, que explican el funcionamiento del universo–.

El CERN obtuvo su primer éxito en 1984 cuando dos de sus científicos obtuvieron el Premio Nobel de Física por el descubrimiento de los bosones W y Z, partículas de la interacción nuclear débil, conocidos como bosones intermedios. También en su seno nació, en 1990, el protocolo worldwide web (www), del físico británico Tim Berners-Lee, Premio Príncipe de Asturias de Investigación Científica y Técnica 2002, con el fin de que sus científicos accedieran a los datos, independientemente de su ubicación geográfica. La producción de isótopos, para la mejora de imágenes médicas y terapias contra el cáncer, es otra de las actividades del CERN, así como el desarrollo de métodos para la eliminación de residuos nucleares, para el ahorro energético mediante el vacío y para su almacenamiento y transporte mediante la superconductividad.

■ Apéndice 2. Los premiados con el Nobel de Física a lo largo de la historia

Desde 1901 se han realizado 107 ediciones del Premio Nobel de Física, pues no hubo premios en 1916, 1931, 1934, 1940, 1941 y 1942. Durante la Segunda Guerra Mundial se concedieron pocos premios y, además, según los estatutos de la Fundación Nobel, cuando no haya ningún trabajo de suficiente importancia entre los trabajos bajo consideración, el premio se reserva para el año siguiente. Durante estos años se ha premiado a un total de 195 científicos. En realidad se han dado 196 galardones de Física, pero John Bardeen lo ganó dos veces. El Premio fue concedido a un único laureado en 47 ocasiones, a dos laureados en 31 ocasiones, y a tres en 29 ocasiones.

Entre los 195 premiados solo se encuentran dos mujeres: Marie Curie, que recibió el premio en 1903, y que también recibió el de química en 1911, y Maria Goeppert-Mayer, quien recibió el Nobel de Física en 1963. El Nobel más joven en todas las disciplinas fue Lawrence Bragg, que tenía 25 años edad cuando re-

cibió el galardón de Física, en 1915, junto con su padre. El de mayor edad, fue Raymond Davis Jr., que tenía 88 años cuando recibió el premio en 2002. La edad media de los Nobel de Física desde 1901 es de 55 años.

No hay ningún premio póstumo de Física. Desde 1974, los estatutos de la Fundación Nobel estipulan que no se puede otorgar un premio a título póstumo, a menos que la muerte haya ocurrido tras el anuncio del premio. Esta es la razón por la que Robert Brout, fallecido en 2011, no haya podido ser premiado, aunque fue co-autor con F. Englert de uno de los artículos que predijeron la existencia del bosón de Higgs.

■ Bibliografía

Bachiller, R. (2012). La astronomía en la encrucijada de la filosofía, la ciencia y la tecnología, Discurso de ingreso a la Real Academia de Doctores de España.

Baggott, J. (2012). Higgs. The invention and discovery of the 'God particle, Oxford University Press.

Chadwick, J. (1932). Possible Existence of a Neutron', Nature 129, 312.

Englert, F. y Brout, R. (1964). Broken Symmetry and the Mass of the Gauge Vector Mesons, Phys. Rev. Lett. 13, 321.

Gell-Mann, M. (1964). A Schematic Model Of Baryons And Mesons, Phys. Lett. 8, 214.

Guralnik, G.S., Hagen, C.R., y Kibble, T.W.B. (). Global Conservation Laws and Massless Particles, Phys. Rev. Lett. 13, 585.

Higgs, R.W. (1964). Broken symmetries, massless particles and gauge fields, Phys. Lett. 12, 132.

Higgs, R.W. (1964). Broken Symmetries and the Mass of the Gauge Bosons, Phys. Rev. Lett. 13, 508.

Lederman, L. (junto con Teresi D) (1996). La partícula divina: si el universo es la respuesta, ¿cuál es la pregunta? Editorial Crítica (Grijalbo Mondadori).

Lleó, A. (2013). Los grandes enigmas del Universo. UPM Press.

Randall, L. (2012). El descubrimiento del Higgs. Una partícula muy especial".
Ed. Acantilado.

Rodrigo, T. y Casas, A. (2012). El bosón de Higgs. CSIC.

www.nobelprize.org

www.atlas.ch

www.fpa.es

cms.web.cern.ch

cern.ch/about/experiments/

http://en.wikipedia.org/wiki/Standard_Model