

Mitos del bosón de Higgs

Por Francis Villatoro

El año 2012 pasará a los anales de la historia de la física por el descubrimiento del bosón de Higgs en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, cerca de Ginebra. La única partícula predicha por la teoría del modelo estándar de las partículas elementales que aún faltaba por encontrar permitirá estudiar el campo de Higgs, responsable de que haya partículas con masa, y las propiedades del universo cuando solo tenía una billonésima de segundo tras la gran explosión (el big bang). Además, muchos físicos creemos que la física del campo de Higgs podría ser una puerta hacia el descubrimiento de nuevas leyes físicas más allá del modelo estándar.

La noticia ha copado todos los medios, pero muy pocos han ofrecido una explicación satisfactoria. Las partículas que tienen masa la adquieren por interacción con el campo de Higgs, no con el bosón de Higgs, que es la excitación de tipo partícula de este campo. El vacío del campo de Higgs no está plagado de bosones de Higgs, sino de bosones de Higgs virtuales, que no son partículas, y que de hecho se definen así: como las excitaciones del campo que no son partículas. El vacío del campo de Higgs no es como una piscina de agua que se extiende por todo el universo, ni las partículas son como peces que avanzan a su través arrastrando el agua a su paso. Este vacío es tan “vacío” como pueda serlo el del campo electromagnético o el del campo del electrón.

Alrededor de la partícula de Higgs se han generado un gran número de mitos y malentendidos. Muchos físicos evitan ideas matemáticas y conceptos abstractos cayendo en analogías inadecuadas que en lugar

de ayudar al profano solo le confunden más. En este artículo trataré de aclarar algunos de los mitos sobre el bosón de Higgs; no están todos, pero espero haber incluido los más comunes.

El campo de Higgs no explica la gravedad

Mucha gente cree que si el campo de Higgs permite explicar el origen de la masa de las partículas, entonces debe ayudar a entender el origen de la gravedad. Sin embargo, esto no es así, la masa es la fuente de la gravedad solo en la física newtoniana, donde los objetos sin masa, como la luz, ni producen, ni perciben la gravedad. Por el contrario, en la teoría de Einstein los rayos de luz se curvan en un campo gravitatorio, ya que la fuente de la gravedad en la teoría de la relatividad es la energía, a través del llamado tensor de energía-momento.

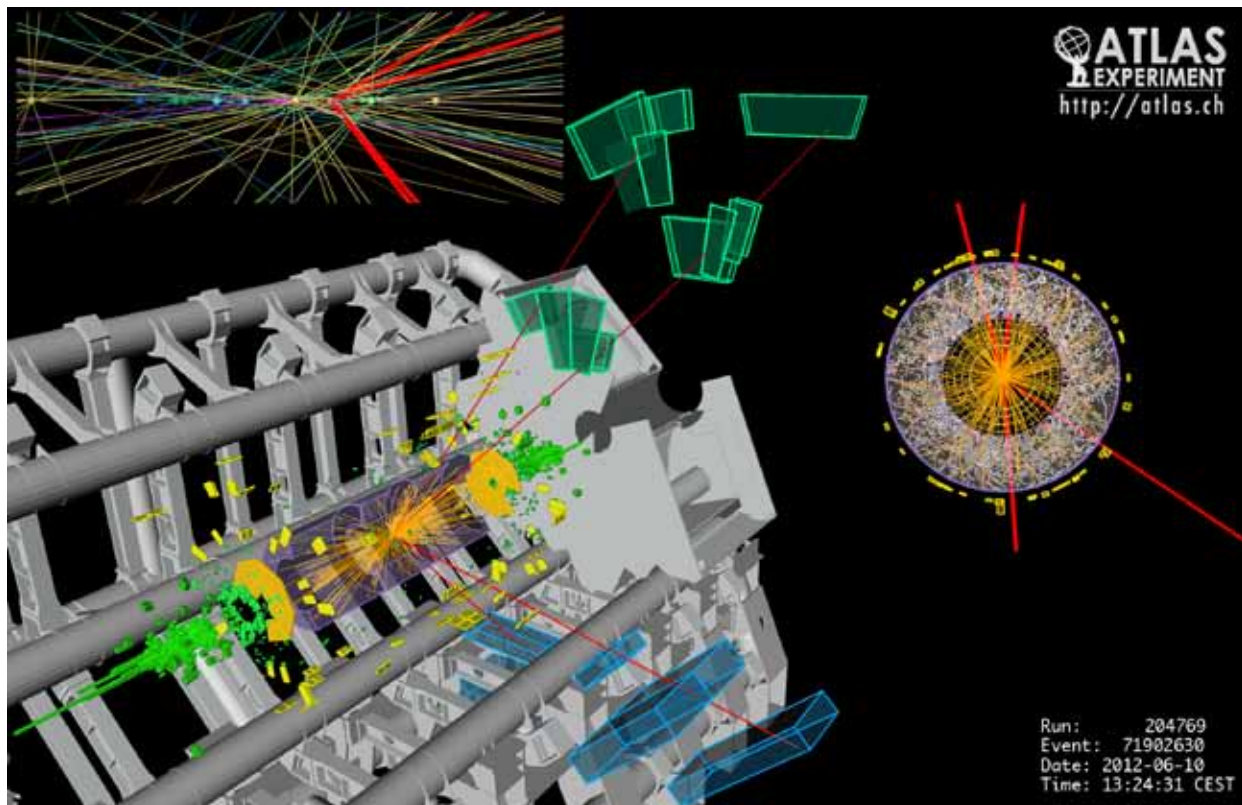


Figura 1. Evento observado por ATLAS candidato a la desintegración de un bosón de Higgs en 4 muones, con una energía total de 124,6 GeV.

En la física newtoniana la masa es una propiedad intrínseca de todos los cuerpos que se conserva; de hecho, Newton se refiere a ella como “cantidad de materia”. Hay dos tipos de masa en la física newtoniana, la inercial y la gravitatoria. La segunda ley de Newton afirma que la fuerza es igual al producto de la masa (inercial) por la aceleración, en símbolos $F=m a$. La ley de la gravitación universal de Newton dice que la fuerza de la gravedad es igual al producto de la masa (gravitatoria) por la aceleración de la gravedad, en símbolos $F=m g$, donde $g=G M/R^2$ (M es la masa que genera el campo gravitatorio, R la distancia entre ambos cuerpos y G es una constante universal). El principio de equivalencia (newtoniano) afirma que la masa inercial y la masa gravitatoria son idénticas.

Los cuerpos en movimiento tienen momento (“cantidad de movimiento”), el producto entre la masa y la velocidad, en símbolos $p=m v$, y energía (cinética), la mitad del producto de la masa por la velocidad al cuadrado, en símbolos $E=m v^2/2$. Tanto el momento como la energía son propiedades conservadas en la física newtoniana, igual que la masa.

En la física relativista los conceptos fundamentales son la energía y el momento. De hecho, la masa es

la energía de un cuerpo en reposo y no se conserva (por ejemplo, en las desintegraciones radiactivas, o en la aniquilación de materia y antimateria). La famosa fórmula de Einstein $E=mc^2$, es válida solo para $p=0$. Para un cuerpo en movimiento la energía es igual a $E^2=(mc^2)^2 + (pc)^2$, de tal forma que la energía de un cuerpo con masa nula, como la luz, es $E=pc$.

La energía (el tensor de energía-momento) es la fuente de la gravedad en la teoría de Einstein y actúa curvando el espacio-tiempo. El principio de equivalencia (relativista) afirma que la gravedad y la aceleración de un cuerpo en un espacio-tiempo curvo son equivalentes entre sí (a nivel local). En la teoría de la relatividad la distinción entre masa inercial y gravitatoria no tiene sentido físico.

Las partículas tienen masa gracias a su interacción con el campo de Higgs, pero incluso si no existiera el campo de Higgs y las partículas no tuvieran masa también serían sensibles a la gravedad. El campo de Higgs, como cualquier otro campo, tiene asociado un tensor de energía-momento, siendo capaz de producir y percibir la gravedad. Por tanto, no hay nada de especial en la conexión entre el Higgs y la gravedad.



CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT
Run/Event: 194108 / 564224000

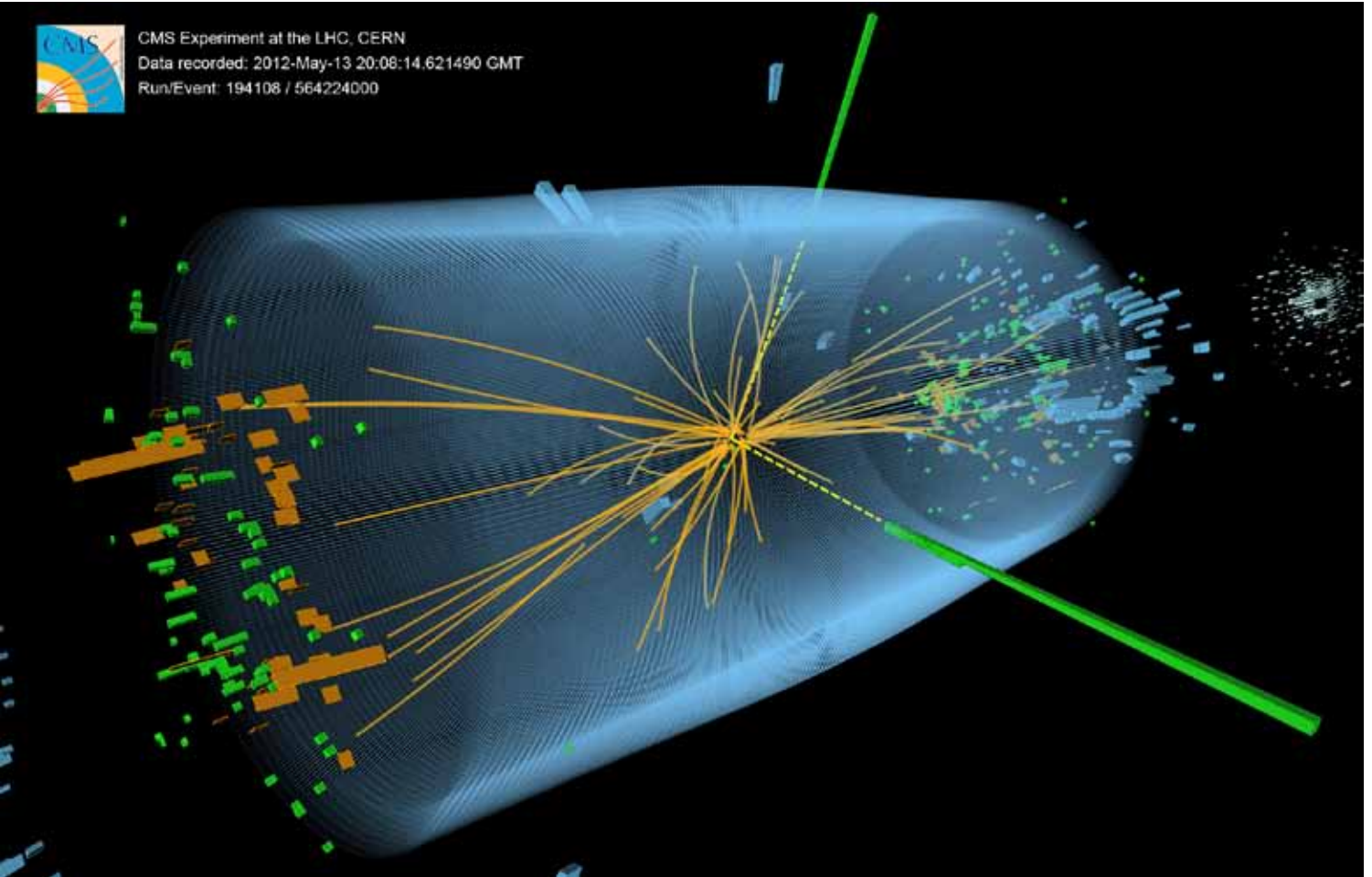


Figura 2. Evento observado por CMS candidato a la desintegración de un bosón de Higgs en dos fotones.

Mucha gente cree que si el campo de Higgs permite explicar el origen de la masa de las partículas, entonces debe ayudar a entender el origen de la gravedad. Sin embargo, esto no es así...

El campo de Higgs no le da masa a los cuerpos

Otro mito muy extendido es que la física del bosón de Higgs permite explicar la masa de todos los objetos que nos rodean en la vida cotidiana. En realidad menos del 5% de la masa de un cuerpo es debida a la masa de las partículas (elementales) que lo forman (quarks y electrones), el resto es energía (tanto cinética como potencial de enlace).

La masa de un cuerpo compuesto de partes es igual a la suma de las masas de cada una de éstas menos la energía de enlace que las une entre sí. La energía de los enlaces químicos que unen los átomos es

despreciable, unas mil millones de veces menor que la masa de un átomo. Los átomos están formados por un núcleo orbitado por electrones ligados a él por un campo electromagnético. Para todos los cuerpos, la masa de los núcleos corresponde a más del 99,9% de la masa total de sus átomos.

Un núcleo está formado por protones y neutrones (es decir, nucleones) unidos entre sí por una fuerza nuclear fuerte (efectiva). La masa de un núcleo siempre es menor que la suma de las masas de sus nucleones (aislados), porque la energía de enlace (llamada defecto de masa) es negativa. Esta energía por nucleón es menor del 1% de su masa, luego más del 99% de la masa de un cuerpo es debida a la masa de sus protones y neutrones.

Los nucleones están compuestos de quarks ligados por la fuerza fuerte, es decir, por un campo de gluones (descritos por la teoría llamada cromodinámica cuántica, QCD).

La masa de los tres quarks (de valencia) que forman el nucleón da cuenta de menos del 1% de su masa total. De hecho, el campo de gluones es tan fuerte que produce multitud de pares quark-antiquark virtuales, por lo que es difícil saber cuánta masa de un nucleón es debida a la masa de sus quarks, es decir, al campo de Higgs. Los modelos numéricos (QCD en redes o lattice QCD en inglés) indican que aproximadamente el 95% de la masa de un nucleón es debida al campo de gluones (suma de energía potencial y cinética).

El vacío del campo de Higgs no es el éter

Un mito que desagrada mucho a los físicos es la interpretación del campo de Higgs como el nuevo éter del siglo XXI. Para explicar el campo de Higgs, que permea todo el espacio-tiempo, como cualquier otro campo fundamental, mucha gente imagina el universo como una piscina inmensa llena de agua en reposo. Todo lo que avanza a través del agua encuentra una resistencia que se interpreta como la masa. Como el agua está en reposo, define un sistema de referencia absoluto, violando los principios de la teoría de la relatividad. Obviamente, esta imagen no tiene ningún sentido físico y ni siquiera permite explicar cómo una partícula puede tener masa cuando está parada. El campo de Higgs es un campo relativista y su valor para el vacío no tiene nada que ver con el éter.

En el siglo XIX el éter era necesario para entender la naturaleza de la luz, ya que se pensaba que si estaba formada por ondas (electromagnéticas) tenía que haber un medio que oscilara, como ocurre con el sonido que son ondas de presión en el aire. Sin embargo, la teoría de la relatividad desterró el concepto de éter porque permite definir un sistema de referencia absoluto, algo incompatible con los resultados de los experimentos. Los campos (relativistas) pueden propagar energía e información de un lugar a otro en forma de ondas y pueden afectar a otros campos sin que exista un medio que oscile. El campo de Higgs es un campo relativista, como puede serlo el campo electromagnético, y en ambos casos el éter es un concepto innecesario.

La idea de asociar el campo de Higgs al éter se justifica porque su vacío tiene un valor positivo de la energía. Los campos permiten la propagación de ondas, que en los campos cuánticos se observan como partículas. El estado del campo sin partículas se denomina vacío y el valor de la energía asignado al vacío es arbitrario. Lo único que se puede medir en los experimentos es la diferencia entre la energía de las partículas del campo y la energía del vacío.

Por convenio, cuando el valor del vacío de un campo no cambia se le asigna un valor igual a cero.

Sin embargo, el valor de la energía del vacío para un campo puede cambiar de valor en una transición de fase, como le ocurre al campo de Higgs. Por encima de cierta energía crítica el vacío toma un valor cero y las partículas de Higgs son ondas del campo respecto a dicho valor nulo; por debajo de esta energía crítica el vacío adquiere un valor positivo y las partículas del campo corresponden a ondas respecto a dicho valor no nulo. En ambos casos el valor asignado a la energía del vacío es constante en todos los puntos del espacio-tiempo y no permite definir ningún sistema de referencia absoluto. Por ello no tiene sentido físico considerar que se asemeja a la noción clásica de éter.

Las partículas virtuales no son partículas

Un mito muy extendido es imaginar el vacío del campo de Higgs colmado de bosones de Higgs, cuando por definición el vacío es el estado del campo sin partículas. De hecho, mucha gente se pregunta por qué cuesta tanta energía producir un Higgs en un laboratorio si el vacío está “repleto” de infinitud de Higgs virtuales. La solución es sencilla, pero sutil, una partícula virtual no es una partícula, porque no cumple con las propiedades que deben cumplir las partículas.

Los diagramas de Feynman son una gran ayuda para los físicos a la hora de calcular las propiedades de las colisiones entre partículas, pero hacen un flaco favor al público inexperto, pues no muestran ninguna diferencia entre las partículas virtuales (las que están entre vértices internos del diagrama) y las partículas (las que tienen algún vértice exterior). A pesar de su nombre, las partículas virtuales son ondas o perturbaciones en un campo que no son partículas y no tienen nada que ver con las partículas.

Todos los campos tienen asociado un tensor de energía-momento que permite asignar valores a la energía (E) y al momento (p) de todas las excitaciones u ondas del campo en cierta región del espacio-tiempo. En un campo cuántico estas excitaciones se pueden contar y se interpretan como cierto número (natural) de excitaciones elementales (este número discreto es proporcional a la raíz cuadrada de la amplitud de las excitaciones). Cuando estas excitaciones elementales cumplen con la ecuación de Einstein $E^2=(m c^2)^2 + (p c)^2$, decimos que se trata de partículas del campo (o estados “on-shell” en inglés). Pero también hay excitaciones elementales que no cumplen con dicha ecuación, a las que llamamos partículas virtuales (o estados “off-shell”).

La teoría de la relatividad prohíbe que se pueda observar en un experimento una perturbación elemental que no cumpla la ecuación de Einstein, luego los estados off-shell no son observables y por eso se llaman “virtuales”. Un fotón siempre se mueve a la velocidad de la luz, pero un fotón virtual es una solución de las ecuaciones cuánticas del campo electromagnético que puede moverse a cualquier velocidad, incluso puede estar en reposo. Un fotón virtual no es un fotón. El nombre “fotón virtual” genera mucha confusión entre los profanos, pero se mantiene por razones históricas.

Cuando otras partículas o campos se mueven por el vacío de un campo concreto se excitan fluctuaciones de tipo partícula virtual en dicho campo que son capaces de intercambiar energía y momento. Hay que tener mucho cuidado con las palabras que se utilizan pues pueden sugerir ideas que no son correctas. Por ejemplo, se suele decir que cuando dos electrones se acercan y luego se repelen, lo que ha ocurrido es que han intercambiado un fotón virtual (así se dibuja en el correspondiente diagrama de Feynman). Un lector profano se imaginará un fotón yendo y viniendo entre los dos electrones. En realidad, la presencia de los electrones altera el campo electromagnético que reacciona intercambiando energía y momento con ellos, provocando que ambos se repelan. La alteración se describe en los diagramas de Feynman como una infinidad de partículas virtuales, pero solo deben ser interpretados como representaciones simbólicas de las soluciones de las ecuaciones del campo. Imaginar partículas donde el diagrama solo refleja la presencia de partículas virtuales solo lleva a sinsentidos.

Las partículas no ganan masa al rodearse de Higgs

Muchas veces se explica el mecanismo por el cuál el campo de Higgs dota de masa a las partículas de la siguiente forma. En una sala llena de gente entra una persona famosa. Mucha gente se acerca a ella y le rodea para pedirle un autógrafo o lo que sea, con lo que ella se mueve por la sala mucho más despacio que si ésta estuviera vacía. Esta persona famosa se comporta como si fuera muy pesada y le costara mucho andar.

Un mito muy extendido es imaginar el vacío del campo de Higgs colmado de bosones de Higgs, cuando por definición el vacío es el estado del campo sin partículas.

Si entrara en la sala una persona desconocida, nadie se le acercaría y le sería fácil esquivar a la gente, con lo se movería mucho más rápido. Un pájaro capaz de volar por encima de las cabezas de la gente sería capaz de cruzar la sala como si no hubiera nadie. La gente de la sala serían los bosones de Higgs, el famoso una partícula con mucha masa, el desconocido una con poca masa y el pájaro una sin masa. Obviamente, esta descripción no tiene nada que ver con la física del campo de Higgs. Para entender el origen de la masa de una partícula como un electrón o un quark hay que saber lo que es la quiralidad de un fermión (una partícula de espín semientero).

Todos los electrones del universo son exactamente iguales, indistinguibles entre sí salvo por su energía, su momento y la región del espacio-tiempo donde están localizados. Richard Feynman decía que había un solo electrón en todo el universo. Con ello quería decir que todos los electrones son excitaciones localizadas de un único campo que permea todo el espacio-tiempo, que podemos llamar campo electrón (o electrónico).

El campo electrón tiene espín igual a un medio, lo que significa que tiene cuatro componentes (bispinor) agrupadas en dos parejas (espinores); las componentes son los números complejos que especifican matemáticamente el campo en cada punto del espacio-tiempo. En una base adecuada, las ondas localizadas en la primera pareja representan los electrones (e^-) y las de la segunda pareja sus antipartículas, los positrones (e^+). La quiralidad es la propiedad que permite distinguir entre las dos componentes de cada pareja. Una componente tiene quiralidad dextrógira (e_R) y la otra levógira (e_L). Por tanto, las partículas del campo electrón son de cuatro tipos: electrón dextrógiro, electrón levógiro, positrón dextrógiro y positrón levógiro.

En los experimentos solo observamos electrones y positrones, sin mayor distinción; la razón es que el electrón tiene masa, es decir, la interacción del electrón con el campo de Higgs mezcla sus dos componentes quirales. Si el electrón fuera una partícula sin masa no habría mezcla y observaríamos dos tipos de electrones, los dextrógiros y los levógiros. El campo de

Higgs intercambia las componentes dextrógiros por las levógiros y viceversa. ¿Por qué este proceso conduce a que el electrón se comporte como si tuviera masa? Porque conlleva un cierto retraso (en física se llama desfase); las excitaciones dextrógiros (levógiros) del electrón excitan el campo de Higgs y se relajan, mientras que el campo de Higgs transfiere dicha excitación a las componentes levógiros (dextrógiros), lo que consume cierta cantidad de tiempo.

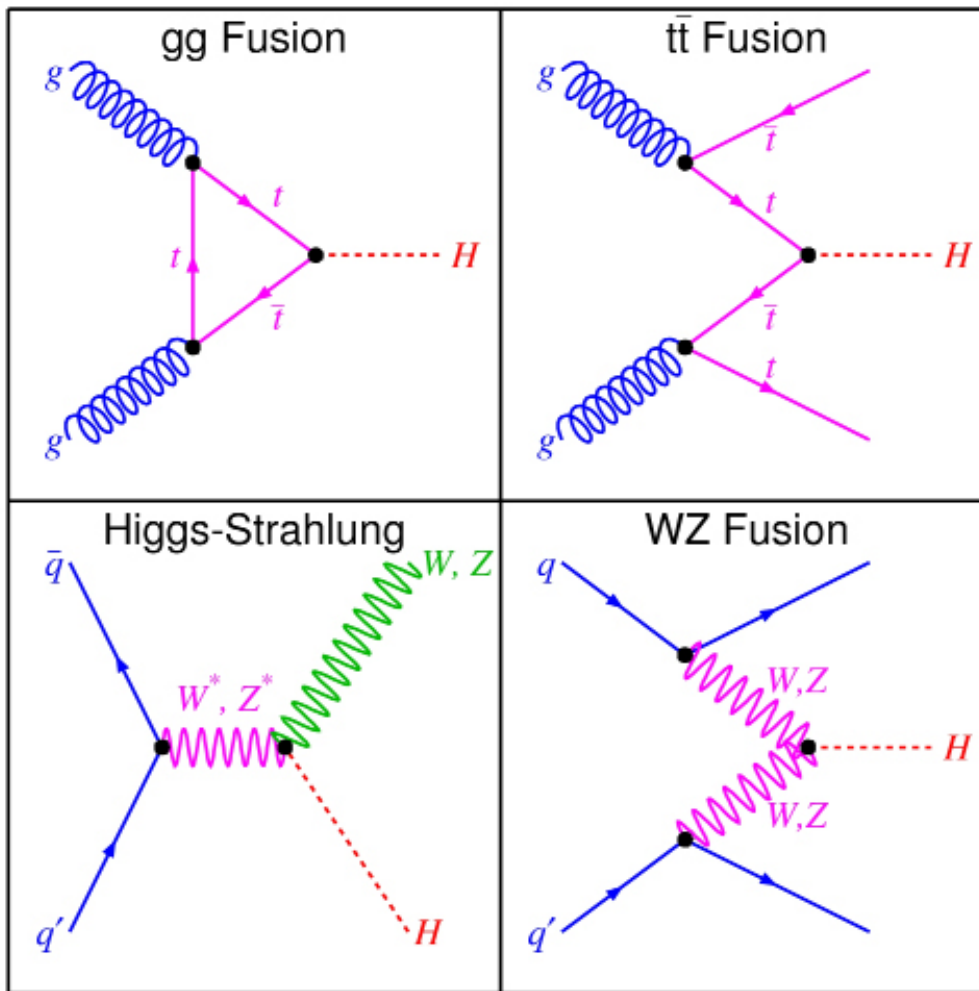


Figura 3. Modos principales de producción del bosón de Higgs en las colisiones del LHC: fusión de gluones, fusión de quarks, Higgs-Strahlung y fusión de bosones vectoriales.

Un símil clásico para imaginar este proceso son dos péndulos acoplados por una cuerda. Si ponemos a oscilar uno de los péndulos con el otro en reposo, observaremos que la cuerda transfiere el movimiento y el que estaba en reposo se pone a oscilar, mientras el primero reduce la amplitud de sus oscilaciones hasta pararse. En ese momento el proceso se repite a la inversa y así sucesivamente. En este símil cada péndulo es una componente quiral del electrón y la cuerda es el campo de Higgs.

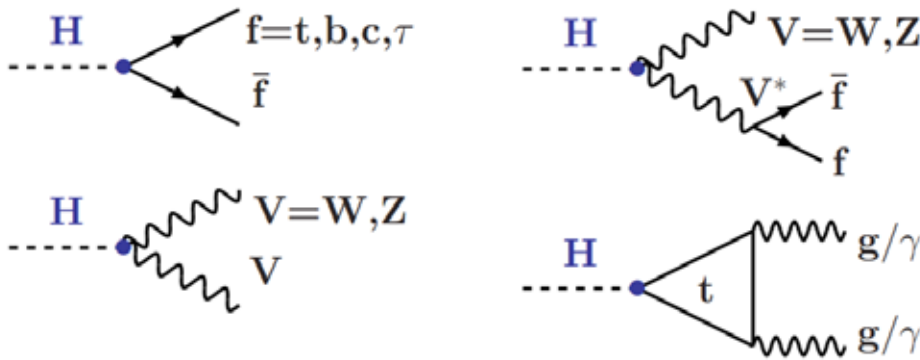
Las partículas W y Z adquieren masa de otra forma

Muchas veces cuando se cuenta la física del Higgs no se hace distinción en cómo adquiere masa un fermión (electrón o quark) y un bosón vectorial (W o Z). Todas las partículas se meten en el mismo saco (usando el símil de la persona famosa que entra en una sala abarrotada de gente o cualquier otro). Sin embargo, el proceso físico es completamente diferente.

El campo de Higgs no es un único campo escalar, sino dos campos escalares complejos (lo que se llama un doblete), es decir, tiene cuatro componentes reales que pueden excitarse de forma independiente. A alta energía, las excitaciones del campo de Higgs corresponden a cuatro partículas de Higgs, dos neutras (h, H⁰) y dos cargadas (una positiva H⁺ y otra negativa H⁻). A estas energías, el campo de Higgs no se acopla a las demás partículas y por tanto ninguna partícula tiene masa (salvo los bosones de Higgs, que pueden acoplarse a sí mismos).

A alta energía se observan tres bosones vectoriales W, llamados W¹, W² y W³, y un campo vectorial similar al fotón llamado B. Las partículas de estos cuatro campos son partículas sin masa, como el fotón, por lo que son excitaciones de las dos componentes transversales a la dirección del movimiento de sus respectivos campos. El campo de Higgs no se acopla a ninguna de estas partículas.

Figura 4. Modos principales de desintegración del bosón de Higgs en pares de fermiones, pares de bosones vectoriales y pares de fotones (o gluones).



Un mito que desagrada mucho a los físicos es la interpretación del campo de Higgs como el nuevo éter del siglo XXI.

A baja energía, la transición de fase electrodébil cambia las propiedades del campo de Higgs que pasa a acoplarse a los bosones vectoriales. En concreto, las dos componentes reales del campo de Higgs, las que corresponden a los Higgs cargados, se acoplan a los campos W^1 y W^2 de tal forma que se excitan de forma solidaria con sus componentes transversales, actuando como si fueran una componente longitudinal (en la dirección del movimiento). Como resultado de este acoplamiento, dichos campos se comportan como dos bosones vectoriales cargados con masa, las partículas W^+ (combinación $W^1 + W^2 + H^+$) y W^- (combinación $W^1 + W^2 + H^-$). Coloquialmente se dice que los bosones W se han “comido” los dos Higgs cargados.

Lo que ocurre con los campos W^3 y B es un poco más complicado, porque se combinan de dos formas distintas resultando dos tipos de excitaciones que se comportan como partículas muy diferentes entre sí. La combinación $B-W^3+H^0$ corresponde al bosón Z , siendo la tercera componente real del campo de Higgs la que actúa como componente longitudinal de la correspondiente partícula vectorial neutra con masa. La otra combinación, $B+W_3$, no se acopla con el campo de Higgs y se observa como una partícula vectorial neutra sin masa, el fotón.

La cuarta componente real del campo de Higgs, a baja energía, se comporta como un campo escalar neutro h cuyas excitaciones son los bosones de Higgs. Estas partículas tienen masa por autointeracción, es decir, estos bosones de Higgs se ven rodeados de una “nube” de excitaciones del campo de Higgs que les dota de masa. Solo en el caso del bosón de Higgs podemos decir que la analogía del famoso en la sala llena de gente es una descripción aceptable.

Para producir la partícula de Higgs en un colisionador de partículas tenemos que excitar el vacío del campo de Higgs con una energía muy grande, por ello ha sido necesario el LHC para descubrirla. Esta partícula tiene

espín cero, es neutra para la carga eléctrica y, como en el caso del fotón, es su propia antipartícula, es decir, que dos bosones de Higgs pueden colisionar y aniquilarse mutuamente.

El cambio de las propiedades del campo de Higgs por debajo de cierta energía crítica se denomina mecanismo de Higgs para la rotura espontánea de la simetría electro-débil. En esta presentación he omitido ciertos detalles técnicos (como los ángulos de Weinberg), pero quiero acabar destacando que predice una relación muy concreta entre las masas de los bosones W y Z , que ha sido verificada por los experimentos. Sin embargo, no predice la masa del bosón de Higgs, parámetro que ha de ser determinado experimentalmente.

El Higgs no se acopla a los fotones

El último mito que voy a presentar es el acoplamiento del Higgs a las partículas sin masa (fotones y gluones). Muchas veces se interpreta que la producción de una partícula de Higgs por fusión de gluones corresponde a la colisión de dos gluones (que son partículas sin masa, como el fotón). También se afirma que un Higgs puede desintegrarse directamente en dos fotones.

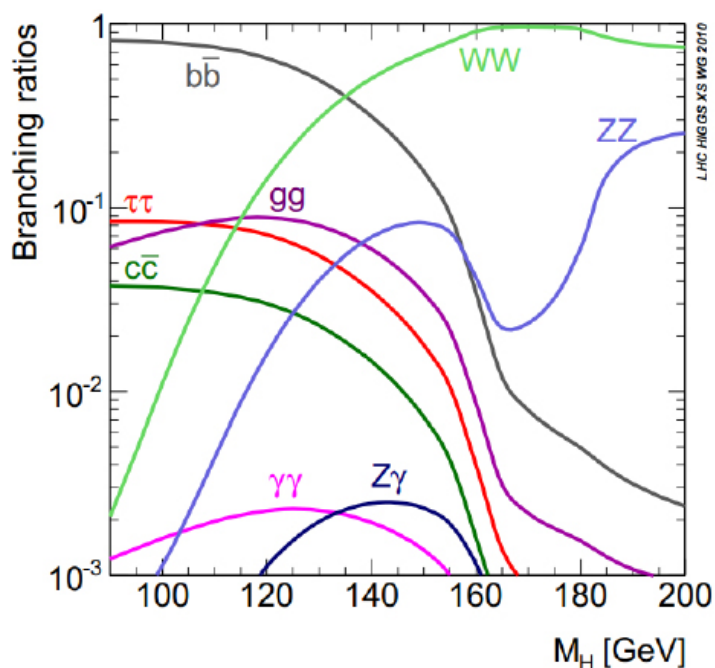


Figura 5. Probabilidades de desintegración de un Higgs en diferentes modos en función de su masa.

La desintegración de un Higgs en dos fotones es el proceso inverso a la fusión de gluones y suele estar mediada por un vértice con tres quarks top. En concreto, el Higgs se desintegra en un par top-antitop, uno de los cuales emite un fotón y cambia de trayectoria para colisionar y aniquilarse con el otro quark produciendo otro fotón. Esta carambola, digna de los mejores jugadores de billar, requiere que una colisión del LHC produzca un Higgs suficientemente energético como para desintegrarse en un par top-antitop, lo que hace que este suceso sea raro y ocurra menos del 1% de las veces. Por ello, observar el Higgs en el canal de desintegración en dos fotones es muy difícil, pero sin embargo, la señal es tan clara que ha sido en este modo en el que se ha observado el Higgs (junto con el modo de desintegración en dos bosones Z, que a su vez se desintegra en cuatro leptones, que ocurre alrededor del 0,1% de las veces).

Conclusiones finales

La partícula observada en el LHC del CERN en la búsqueda del bosón de Higgs del modelo estándar tiene algunas propiedades que apuntan a que se trata de un bosón de Higgs, pero no sabemos aún si se trata del bosón de Higgs predicho por el modelo estándar. Para asegurarlo habrá que estudiar que cumple con todas las propiedades que predice la teoría. Por el momento solo sabemos que se han observado pequeñas desviaciones que podrían ser resultado de fluctuaciones estadísticas en los datos. Hasta que no se analicen más colisiones no se podrá conocer la respuesta definitiva. En diciembre de 2012, el CERN anunciará nuevos resultados que esperamos que aclaren un poco la situación.

[Francis Villatoro](#)



En realidad la partícula de Higgs se acopla solo a las partículas que tienen masa y se acopla más a las partículas que tienen más masa. La fusión de dos gluones y la desintegración en dos fotones están mediadas por un vértice formado por tres quarks (normalmente, tres quarks top).

La fusión de gluones explica más del 90% de los Higgs producidos en el LHC. Este proceso ocurre casi siempre vía tres quarks top; en concreto, un gluón produce un par top-antitop, uno de los cuales interactúa con otro gluón cambiando su trayectoria para volver a colisionar con el otro miembro del par. El resultado es un vértice triangular formado por tres quarks, en dos de cuyos vértices inciden los dos gluones y cuyo tercer vértice produce el Higgs. Casi todo el 10% restante de los Higgs se produce por fusión de bosones W o Z; en este proceso dos quarks producen dos bosones (W o Z) que colisionan produciendo el Higgs. Por tanto, ni los gluones, que no tienen masa, ni los quarks del protón, que tienen una masa muy pequeña, pueden producir directamente un Higgs, que requiere la interacción de las partículas más masivas conocidas, de ahí que producirlo en el LHC requiera un gran número de colisiones.