

Martine Bosman investiga en el Instituto de Física de Altas Energías de Barcelona y es presidenta del consejo de colaboración del experimento ATLAS del LHC.

Teresa Rodrigo investiga en el Instituto de Física de Cantabria y en el experimento CMS, del cual también preside el consejo de colaboración.



ALTAS ENERGÍAS

La búsqueda del bosón de Higgs

Los experimentos CMS y ATLAS del Gran Colisionador de Hadrones han anunciado el descubrimiento de una nueva partícula que podría ser el bosón de Higgs. ¿Cómo se ha llegado hasta aquí?

Martine Bosman y Teresa Rodrigo

EL PASADO 4 DE JULIO, EN EL AUDITORIO DEL CERN SE RESPIRABA el ambiente de los grandes días: la organización había convocado para aquella mañana un seminario en el que se harían públicos los últimos resultados relativos a la búsqueda del bosón de Higgs en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC). Tanta era la expectación que, para no perderse el acontecimiento, algunos de los asistentes habían pasado la noche frente a la sala de conferencias. Poco después, los portavoces de las colaboraciones CMS y ATLAS, Joe Incandela y Fabiola Gianotti, anunciaban que sus respectivos experimentos habían descubierto una nueva partícula subatómica.

Tras la presentación de los resultados, Rolf Heuer, director del CERN, tomó la palabra y exclamó: «Como profano, diría: ¡Creo que lo tenemos! Se trata sin duda de un hito histórico, pero al mismo tiempo es solo el principio. Aún nos queda mucho por delante». El auditorio estalló en un larguísimo aplauso y se puso en pie.

La cuenta atrás para la presentación de los resultados había comenzado muy poco antes: el 19 de junio. Ese día se registraron en el LHC las últimas colisiones entre protones antes de iniciar una corta parada técnica. Con ello se completaba la muestra de datos que debían analizarse de cara al congreso mundial más importante en física de partículas, la Conferencia Internacional en Física de Altas Energías (ICHEP), la cual iba a celebrarse en Melbourne entre el 4 y el 11 de julio. Ambas colaboraciones comenzamos entonces nuestra particular carrera para analizar

la mayor cantidad posible de datos y alcanzar la máxima sensibilidad en la búsqueda del ansiado bosón de Higgs.

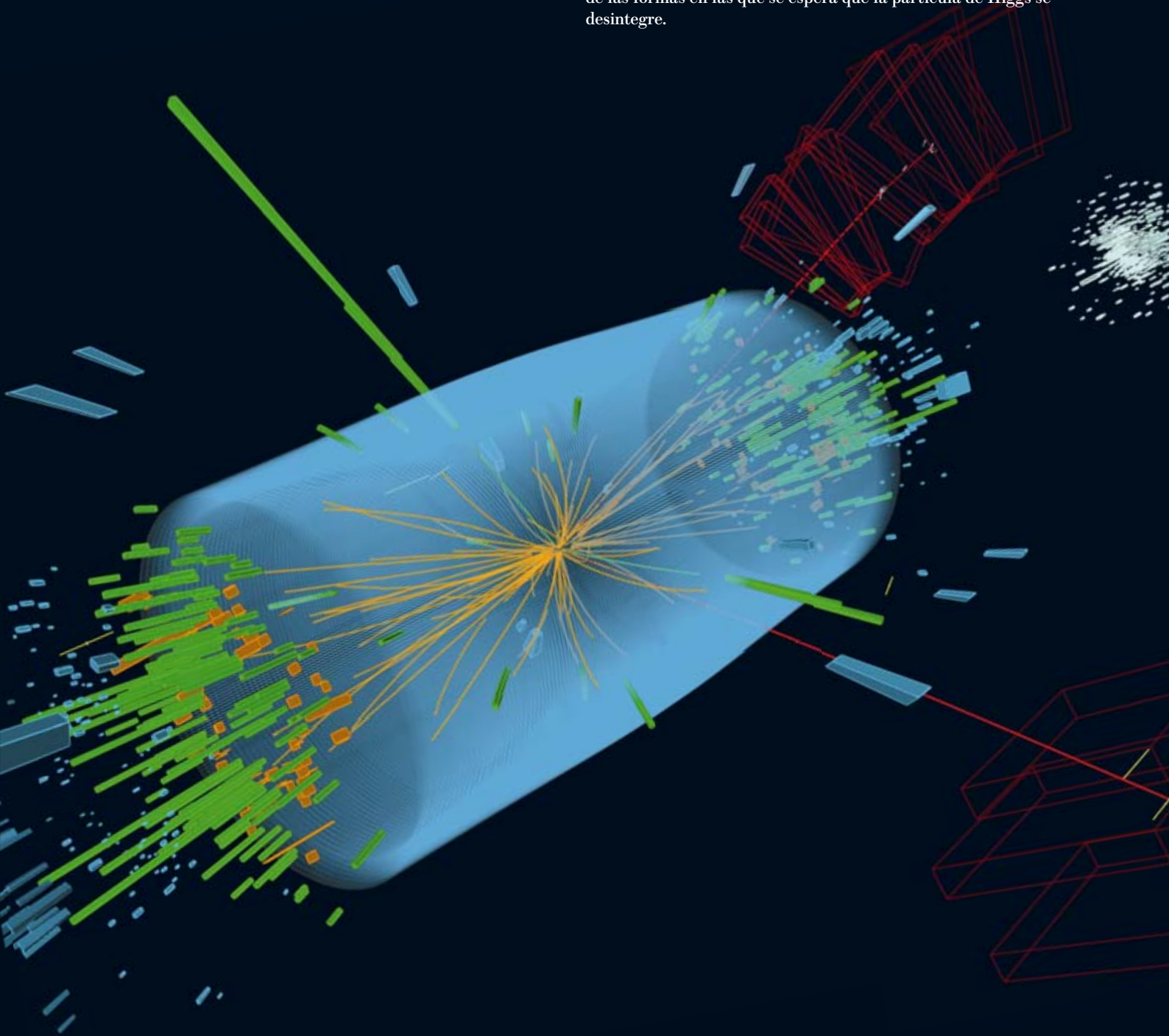
Los físicos llevan décadas invirtiendo cantidades enormes de ingenio y recursos en esa búsqueda. Ello se debe a que el bosón de Higgs no es una partícula más: desempeña un papel muy destacado en nuestra concepción de las leyes más profundas de la naturaleza.

Todo lo que sabemos sobre el

mundo subatómico queda englobado en el modelo estándar, una teoría que describe con una precisión extraordinaria las propiedades de todas las partículas elementales conocidas y la manera en que estas interactúan entre sí. Sin embargo, existe una cuestión fundamental para la que el modelo estándar no encuentra fácil respuesta: ¿por qué las partículas elementales poseen masa? La pregunta surge porque, en principio, las ecuaciones básicas que describen las interacciones entre partículas nos dicen que estas deberían carecer de masa. Pero, si así fuese, el universo mostraría un aspecto completamente distinto del que conocemos. No habría átomos ni materia ordinaria y, por supuesto, no existiríamos.

Es aquí donde interviene el mecanismo de Higgs. La idea consiste en postular la existencia de un «medio» omnipresente en el universo: el campo de Higgs. Al interactuar con di-

Este evento, registrado en el detector CMS el 27 de mayo a las 23:35, es uno en el que los físicos creen que podría haberse producido un bosón de Higgs. En él se generaron un par electrón-positrón (*líneas verdes*) y un par muon-antimuón (*líneas rojas*), una de las formas en las que se espera que la partícula de Higgs se desintegre.



EN SÍNTESIS

Propuesto en los años sesenta, el mecanismo de Higgs da respuesta a una pregunta nada obvia: ¿por qué las partículas elementales tienen masa?

De dicho mecanismo puede deducirse la existencia de un bosón masivo jamás observado hasta ahora. Los físicos llevan decenios intentando dar con él.

En fecha reciente, dos experimentos del LHC del CERN han referido el descubrimiento de una nueva partícula que bien podría ser el bosón de Higgs.

En este artículo se explica la larga carrera experimental y el delicado proceso de análisis de datos que han hecho posible ese descubrimiento.

cho medio, las partículas adquieren masa como resultado de la fricción que se genera. Esta explicación del origen de la masa fue propuesta por primera vez en 1964 por Robert Brout y François Englert y, muy poco después, también por Peter Higgs. Este último señaló, además, que dicho mecanismo implicaba la existencia de una nueva partícula elemental, también dotada de masa: lo que hoy conocemos como bosón de Higgs. Este se correspondería con las excitaciones fundamentales de ese campo ubicuo, del mismo modo en que los fotones (las partículas que componen la luz) se corresponden con las excitaciones fundamentales del campo electromagnético. Con el tiempo, el bosón de Higgs se ha convertido en la partícula más buscada por los físicos [véase «Un abanico de partículas», por J. Bernstein, en este mismo número].

EQUIPO PARA UN LARGO VIAJE

¿Qué necesitamos para poner de manifiesto la existencia del bosón de Higgs? En primer lugar, un colisionador de partículas. En el LHC se aceleran haces de protones a velocidades muy próximas a la de la luz y se hacen circular en sentidos opuestos hasta que chocan entre sí. La teoría nos dice que, si el bosón de Higgs existe, debería producirse en algunas de esas colisiones de alta energía. No obstante, la probabilidad de que ello ocurra resulta extremadamente baja: para los experimentos que ha estado llevando a cabo el LHC, puede estimarse que hacen falta decenas de miles de millones de choques de protones para producir un bosón de Higgs. Ello nos sitúa ante el reto de tener que analizar una cantidad descomunal de colisiones. Entre 2011 y 2012, en el LHC se han generado datos a partir de unos mil billones (10^{15}) de colisiones protón-protón.

Pero las dificultades no acaban ahí. Una vez producido, el bosón de Higgs se desintegra inmediatamente en otras partículas más comunes. Por tanto, no cabe observarlo de manera directa, sino que su existencia debe inferirse a partir de las partículas en las que se desintegra. El modelo estándar no predice la masa del bosón de Higgs. Sin embargo, para cada valor posible de la masa, lo que sí nos dice es con qué frecuencia debería desintegrarse de una forma u otra. Las posibilidades son varias, aunque dos de las señales más claras proceden de la desintegración en dos fotones y en cuatro leptones dotados de carga eléctrica (dos pares electrón-positrón o muon-antimuón). Por tanto, el segundo instrumento que necesitamos es un detector capaz de identificar esos productos de desintegración, medir todas sus características cinemáticas y reconstruir las propiedades de la partícula madre. ATLAS y CMS son los dos grandes detectores que se diseñaron para cumplir con este reto.

El LHC es el mayor y más potente acelerador de partículas jamás construido. Emplazado cerca de la ciudad de Ginebra, consta de un anillo de 27 kilómetros situado a unos cien metros

bajo tierra. Se compone de más de 9600 imanes de tipos diversos, entre los que destacan 1200 dipolos superconductores que operan a 271 grados Celsius bajo cero, una temperatura inferior a la del espacio exterior. En el interior del anillo, los haces de protones circulan en sentidos opuestos por sendos tubos de ultravacío. En 2011 se aceleraban hasta alcanzar una energía de 3,5 teraelectronvoltios (TeV) cada uno, con lo que se provocaban choques frontales con una energía total de 7 TeV (unas 7500 veces la energía asociada a la masa de un protón). En 2012, las colisiones se han realizado a 8 TeV. En general, cuanto mayor sea la aceleración de los protones, de más energía dispondremos en cada choque para producir nuevas partículas. Las colisiones se provocan en zonas determinadas, para lo cual los haces de protones se focalizan por medio de lentes magnéticas. La precisión requerida puede compararse a la que se necesitaría para disparar dos agujas separadas una distancia de 10 kilómetros y conseguir que se encuentren en el camino. El proyecto del LHC fue concebido durante los años ochenta. Su construcción se aprobó a finales de 1994, y en 1998 comenzaron las excavaciones de las inmensas cavernas subterráneas que hoy albergan los detectores. La obra civil se prolongó durante cinco años.

Los detectores ATLAS y CMS se concibieron para cubrir el programa de investigación más amplio posible. La búsqueda del bosón de Higgs, por supuesto, pero también la de física más allá del modelo estándar: partículas supersimétricas, dimensiones adicionales del espacio, etcétera. Ambos detectores persiguen las mismas metas, pero trabajan de manera independiente y difieren en su diseño y soluciones técnicas. Con ello, se busca garantizar la fiabilidad de los resultados obtenidos por uno y otro.

La idea básica de un detector consiste en rodear por completo la región donde se producen las colisiones con gruesas capas cilíndricas, dispuestas a modo de barril en torno al tubo por el que circulan los protones, y cerradas en los extremos. Cada capa se encarga de detectar los distintos tipos de partículas que se producen en los choques.

La capa más interna rastrea la trayectoria de las partículas con carga eléctrica. Ello se consigue midiendo la ionización que dichas partículas generan en el material del dispositivo a medida que lo atraviesan. Suelen emplearse láminas finas de silicio divididas en píxeles (como los de las cámaras fotográficas) o en bandas finas para la lectura de carga, lo cual permite determinar la localización de la partícula. Este instrumento, denominado detector de trazas, se encuentra inmerso en un campo magnético que fuerza a las partículas con carga eléctrica a seguir una trayectoria helicoidal. Al medir esa trayectoria, puede inferirse el momento de la partícula.

El calorímetro electromagnético forma la siguiente capa. Su función consiste en absorber los fotones, electrones y positrones generados en los choques. Al penetrar en el calorímetro, estas

1964

Varios expertos (Peter Higgs entre ellos) proponen un mecanismo teórico que permite que las partículas portadoras de interacciones adquieran masa. Higgs vaticina que este modelo implica la existencia de un bosón masivo nunca antes detectado.

1967

Dicho mecanismo se incorpora a la teoría de las interacciones débiles y electromagnéticas. Ello permite entenderlas como una sola interacción fundamental y, como «efecto colateral», explica también la masa de las partículas elementales de materia. Con el tiempo, el bosón de Higgs se convertirá en la partícula más buscada por los físicos.

1994

El CERN aprueba la construcción del LHC, el instrumento científico más complejo jamás construido. Uno de sus principales objetivos será encontrar el bosón de Higgs.

1998

Comienzan las excavaciones para instalar los grandes detectores ATLAS, CMS, ALICE y LHCb en el túnel subterráneo de aceleración que ya empleaba el LEP, el antecesor del LHC.

Construcción del detector CMS. ▶



partículas generan una «cascada electromagnética», la cual resulta de una cadena de reacciones en las que un fotón produce un par electrón-positrón, que a su vez emiten un fotón, etcétera. Las partículas generadas a lo largo de la cascada presentan energías cada vez menores, hasta que finalmente el calorímetro absorbe toda la energía de la partícula inicial. La señal total que deja la cascada resulta proporcional a dicha energía, motivo por el que el dispositivo recibe el nombre de calorímetro. Los hadrones (las partículas formadas por quarks, como los piones, protones, neutrones, etcétera) interactúan de otra manera y requieren más materia para ser absorbidas por completo. De esa absorción se encarga la tercera capa, el calorímetro hadrónico.

Por último, los muones (partículas similares al electrón, pero de mayor masa) interactúan mucho menos con la materia ordinaria y consiguen atravesar los calorímetros. Se detectan también gracias a la ionización que generan al pasar por las cámaras de muones, enormes dispositivos dispuestos alrededor de los calorímetros y en la parte más externa del detector. También en este caso se necesita un campo magnético para curvar sus trayectorias y poder así medir su momento. Mientras que en ATLAS se genera un campo toroidal con ocho grandes bobinas superconductoras en el barril central y otras bobinas situadas en los extremos, en CMS se utiliza el campo de retorno (exterior a la bobina) del potente solenoide central que, en su interior, genera un campo magnético de cuatro teslas, cien mil veces más intenso que el campo magnético terrestre.

Los neutrinos, en su calidad de partículas carentes de carga eléctrica y que apenas interactúan con la materia, escapan de los detectores sin dejar rastro. En principio, su presencia puede inferirse cuando se observa que en un suceso «falta» momento o energía. No obstante, ello da lugar a no pocas complicaciones, ya que en ocasiones esa falta de energía puede deberse a un error instrumental, pero interpretarse erróneamente como la producción de un neutrino.

Los detectores ocupan un tamaño enorme, equivalente al de un edificio de varias plantas cada uno. Ello se debe a que las partículas generadas en los choques salen disparadas en todas direcciones con energías muy elevadas, por lo que recorren largas distancias antes de ser detectadas o absorbidas. Además, las señales deben poder leerse con una granularidad muy fina, a fin de reconstruir las trayectorias o las cascadas con la mayor precisión posible. Para ello, cada detector cuenta con unos 90 millones de canales de lectura de datos, lo que les permite acumular enormes cantidades de información. Cada año se registran más de 3000 teraoctetos: el equivalente a 7 kilómetros de CD-ROM apilados, o 600 años de canciones. De hecho, el número de colisiones registradas se encuentra limitado por el volumen de datos que resulta posible almacenar. Por ello, ambos experimentos requieren un sistema de selección de datos en

tiempo real que les permita identificar y registrar las colisiones de mayor interés. Por sí solo, esto ya constituye un reto de enormes proporciones: aunque cada segundo se producen unos 20 millones de colisiones de protones (una o más cada 50 nanosegundos), se graban solo unos cientos de ellas.

SEÑAL Y RUIDO

Una vez almacenados los datos, su tratamiento procede en dos etapas. Primero, con la información registrada por el detector de trazas se reconstruyen las trayectorias de las partículas dotadas de carga eléctrica, se analiza la energía depositada en los calorímetros (ya sea el hadrónico o el electromagnético) y se reconstruye la trayectoria de los muones. Con estos datos, se elabora una lista de todas las partículas o chorros de partículas que se produjeron en un suceso. Para ello, las energías deben calibrarse con gran precisión.

A continuación, se analizan esos datos. Cada proceso físico que se desea estudiar queda caracterizado por su estado final; es decir, el número y naturaleza de las partículas que lo componen. A la hora de buscar sucesos con las características que se esperan de la desintegración de un bosón de Higgs, aparecen dos grandes dificultades. En primer lugar, tales procesos ocurren con una frecuencia extremadamente baja: por ejemplo, la producción de un bosón de Higgs y su desintegración en cuatro leptones ocurre una vez por cada diez billones (10^{13}) de colisiones entre protones. Pero, además, ese mismo tipo de estado final puede provenir de todo tipo de procesos «de fondo» en los que no se ha creado ningún bosón de Higgs. Los sucesos de fondo originan una ingente cantidad de «ruido» estadístico que dificulta sobremanera la identificación de los procesos genuinos en los que se ha generado una nueva partícula.

La relación entre el nivel de señal y el de fondo depende del modo de desintegración. La desintegración del bosón de Higgs en dos fotones goza de una señal mayor que la desintegración en cuatro leptones, pero presenta más fondo. Otro factor de gran importancia es la posibilidad de deducir la masa de la partícula madre. Esto puede lograrse con muy buena precisión en los procesos en los que se producen dos fotones o cuatro leptones dotados de carga eléctrica. Otros casos revisten mayor complejidad. Por ejemplo, el bosón de Higgs puede desintegrarse también en dos bosones W , cada uno de los cuales da lugar a un leptón cargado (un electrón o un muon) y un neutrino. Al no interactuar con el detector, la presencia de dos neutrinos en el estado final dificulta la reconstrucción de la masa de la partícula de origen. A su vez, ello empeora la relación entre señal y ruido de fondo. Cada modo de desintegración necesita un cuidadoso estudio específico.

El proceso completo de operación de los detectores, reconstrucción de sucesos y tratamiento íntegro de los datos requiere

2008

2010

2011

2012

10 de septiembre de 2008
El primer haz de protones de prueba se hace circular con éxito por el anillo del LHC.



30 de marzo de 2010
Comienza la toma de datos: se producen las primeras colisiones entre protones con una energía total de 7 tera-electronvoltios, la energía más elevada alcanzada hasta ese momento en un acelerador de partículas.

◀ Los grandes imanes del detector ATLAS.

13 de diciembre de 2011
Se hacen públicos los primeros resultados significativos sobre la búsqueda del bosón de Higgs: aparecen indicios de la existencia de una partícula desconocida cuya masa rondaría los 125 giga-electronvoltios (GeV).

4 de julio de 2012
El CERN confirma el descubrimiento de una nueva partícula subatómica: un bosón con una masa de unos 125 GeV. Las propiedades de la partícula examinadas hasta el momento resultan compatibles con las que se atribuyen al bosón de Higgs del modelo estándar.

El auditorio del CERN celebra los resultados presentados el 4 de julio. ▼

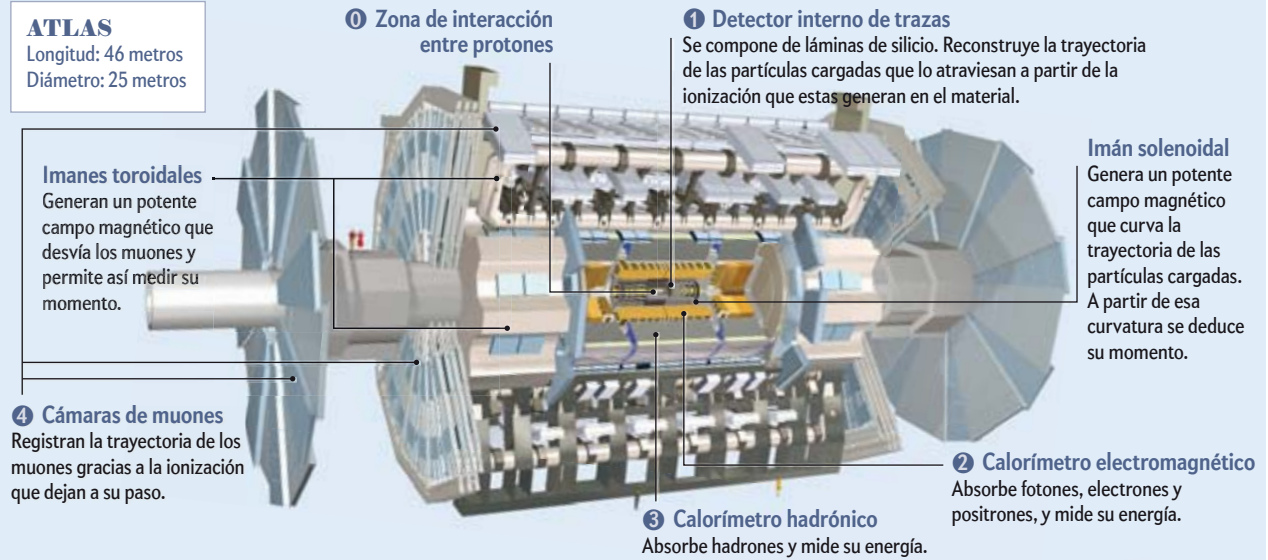


Anatomía de un detector

Los físicos esperan que en algunas —muy pocas— de las colisiones entre protones que lleva a cabo el LHC se produzcan bosones de Higgs. Estos, sin embargo, no pueden observarse de manera directa, ya que una vez creados se desintegran inmediatamente en otras partículas más comunes. Por tanto, deben analizarse las partículas producidas en esos choques e intentar deducir, a partir de sus propiedades, el proceso que las originó. Los gigantes detectores ATLAS (arriba) y CMS (abajo) fueron construidos con este propósito. Constan de varias capas (numeradas del interior al exterior), cada una de las cuales se encarga de localizar o absorber partículas de un tipo específico. Su gran tamaño se debe a que las partículas emergen con una energía muy elevada, por lo que pueden recorrer grandes distancias antes de ser detectadas. ATLAS y CMS operan con tecnologías distintas para validar de manera independiente sus resultados.

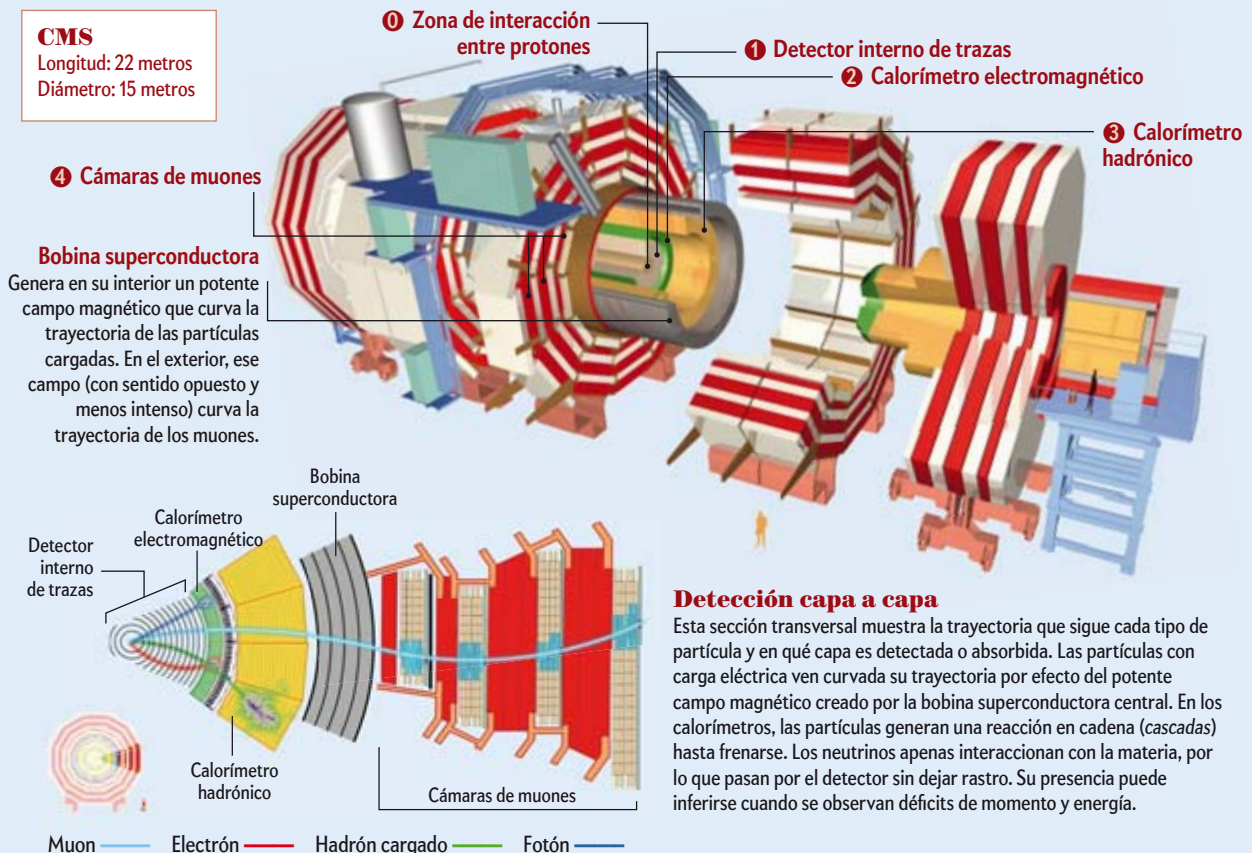
ATLAS

Longitud: 46 metros
Diámetro: 25 metros



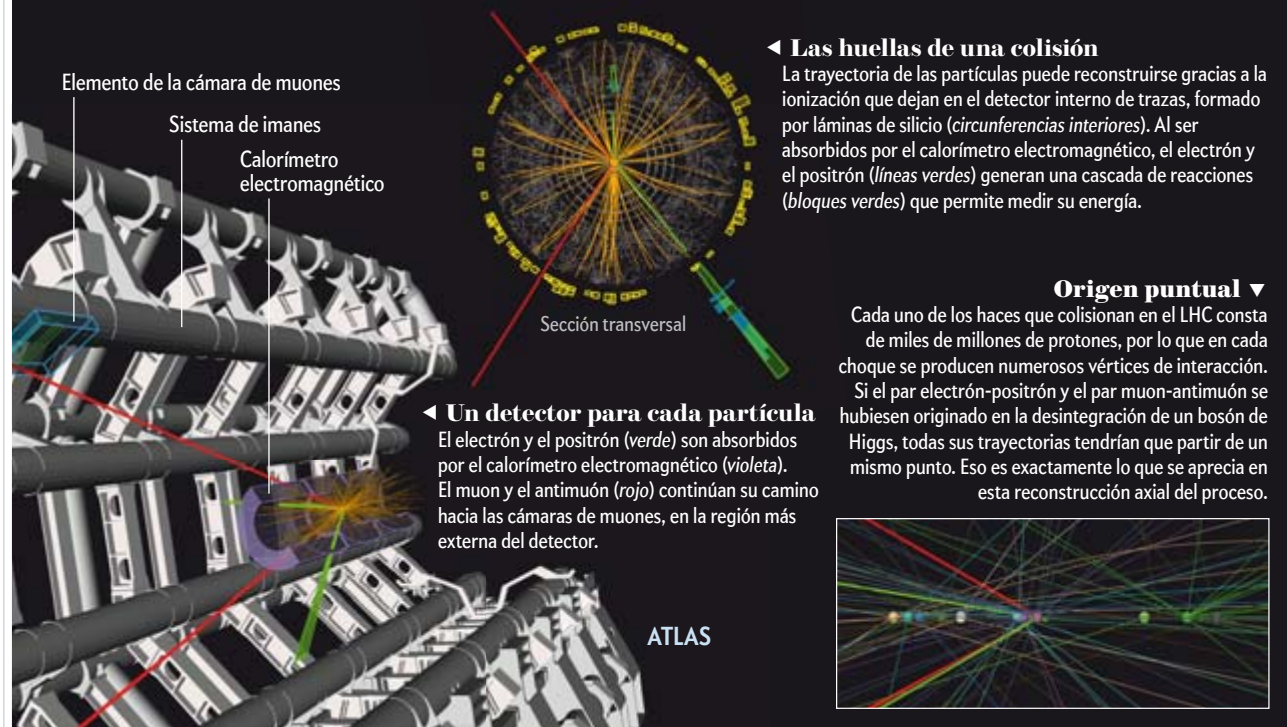
CMS

Longitud: 22 metros
Diámetro: 15 metros



¿Es un bosón de Higgs?

El pasado 18 de junio a las 11:07 se observó este suceso en una de las colisiones de protones registradas por el detector ATLAS. Entre otras muchas partículas (*naranja*), en él se produjeron un par electrón-positrón (*verde*) y un par muon-antimuón (*rojo*). Esa es una de las formas típicas en las que la partícula de Higgs puede acabar desintegrándose. Los físicos intentan identificar este tipo de procesos característicos entre los miles de billones de productos de colisión generados en el LHC durante los últimos dos años.



enormes recursos humanos y de computación. No en vano, las colaboraciones ATLAS y CMS cuentan con más de tres mil miembros cada una, procedentes de unas 180 instituciones de 40 países. Analizar los datos en un tiempo tan breve ha sido posible gracias a una minuciosa preparación durante los últimos años, así como a los vastos medios del sistema de computación distribuida Grid del LHC, en el que participan instituciones de todo el mundo. De hecho, gran parte del trabajo se ha venido realizando en paralelo a la toma de datos: se han llevado a cabo numerosas simulaciones por ordenador tanto de los procesos de fondo como los de señal, al tiempo que se establecían las mejores estrategias para analizar los diferentes modos de desintegración del bosón de Higgs. En la mayoría de los casos, las características topológicas de los sucesos de señal permiten definir criterios de selección para optimizar la relación entre señal y ruido. En otros, sin embargo, la similitud entre ambos tipos de procesos es tal que solo su abundancia relativa permitirá discriminar entre ellos.

Para convencernos de que todo el proceso de calibración, análisis y selección se hace con el menor sesgo posible, en algunos casos se realizan «análisis ciegos». Se seleccionan muestras de datos en los que sabemos con seguridad que predominan los sucesos de fondo (o que, de existir señal, su contaminación sería mínima) y con ellos establecemos los parámetros finales del análisis: intervalos de confianza, correcciones específicas en el detector, calibraciones finales, relaciones de producción de los diferentes tipos de sucesos de fondo, etcétera. Solo entonces, cuando he-

mos aprovechado al máximo toda la estadística disponible y podemos afirmar que entendemos muy bien los procesos de fondo con nuestros nuevos datos, abrimos al análisis las regiones donde podría existir una señal de procesos relacionados con la producción del bosón de Higgs. Esto solo se lleva a cabo en el último momento, de ahí la gran expectación que, también entre nosotros, los investigadores, despiertan los resultados obtenidos en las últimas fases del análisis.

MIRAR EN TODOS LOS SITIOS

Una vez obtenidos los espectros de masa de las muestras de sucesos correspondientes a los distintos modos de desintegración, se procede al análisis estadístico de su composición en términos de los procesos esperados de fondo y de una señal hipotética del bosón de Higgs. Existen varias maneras de interpretar los resultados. Una de ellas consiste en determinar qué valores para la masa del bosón de Higgs quedan excluidos por nuestros datos. A tal fin, para cada valor supuesto de la masa del bosón de Higgs, se calcula cuál es la cantidad máxima de señal que toleran los datos por encima de los procesos de fondo. Para ello, se varía en la simulación la probabilidad de producción del bosón de Higgs. Si dicho límite máximo (experimental) para la producción de un bosón de Higgs con cierta masa resulta inferior al valor teórico predicho por el modelo estándar, la existencia de un bosón de Higgs con esa masa queda descartada.

El límite superior para la producción de bosones de Higgs se obtiene como resultado de un cálculo estadístico. Como tal,

siempre queda determinado hasta un cierto nivel de confianza. En los análisis que han llevado a cabo ATLAS y CMS, dicho nivel asciende al 95 por ciento. En otras palabras, los valores de la masa del bosón de Higgs excluidos por este método dejan un margen del 5 por ciento a que sí exista un bosón de Higgs con esa masa. Con todo, tras analizar todos los datos obtenidos por el LHC durante 2012 y añadirlos a las colisiones de 2011, ambos experimentos obtuvieron resultados muy similares: excluían la existencia del bosón de Higgs en casi todo el intervalo de masas posibles, salvo en una pequeña ventana entre los 122 y 128 gigaelectronvoltios (GeV).

Otra manera de analizar los datos consiste en comparar el número de procesos observados de un cierto tipo (por ejemplo, la producción de dos fotones) con los que esperaríamos medir si solo tuviesen lugar procesos de fondo; es decir, suponiendo que no se ha producido ningún bosón de Higgs. Tanto en el canal de producción de dos fotones como en el de cuatro leptones, ATLAS y CMS observaron excesos significativos de eventos cuando la energía rondaba los 125 o 126 GeV: exactamente en la misma región de masas en la que no podían descartar la existencia del bosón de Higgs.

Sin embargo, los procesos de fondo pueden fluctuar sobre el valor esperado, por lo que siempre cabe la posibilidad de que imiten el efecto de un exceso. Una manera complementaria de interpretar un análisis como el anterior consiste en calcular una cantidad estadística denominada *valor local de p_0* . Este nos da

la probabilidad de que los sucesos de fondo generen un exceso de eventos similar al que correspondería a la producción de un bosón de Higgs. Tras combinar hasta cinco modos de desintegración (incluyendo la desintegración en pares de quarks b y de tauones) en todos los datos acumulados durante 2011 y 2012, ambos experimentos obtuvieron un valor de p_0 próximo a la unidad para casi todos los valores posibles de la masa... salvo en una región: en torno al valor de 125 o 126 GeV, la probabilidad de que los procesos de fondo generasen por sí solos un perfil de datos como el observado descendía bruscamente a uno entre 1,7 millones en el experimento CMS, y a casi uno entre 600 millones en ATLAS.

El valor de p_0 puede expresarse en número de desviaciones estándar, o sigmas. Una desviación estándar se corresponde con la «anchura típica» de una campana de Gauss: la región en torno a la media en la que se encuentran el 68 por ciento de los datos. A una distancia de dos sigmas en torno al valor medio, la campana de Gauss incluye más del 95 por ciento de los datos. Por convenio, para proclamar un descubrimiento en física de partículas se exige que las desviaciones con respecto a la señal de fondo presenten una significancia estadística local de cinco sigmas. Eso quiere decir que la probabilidad de que el resultado se deba a un efecto espurio debe ser inferior a uno entre 1,7 millones.

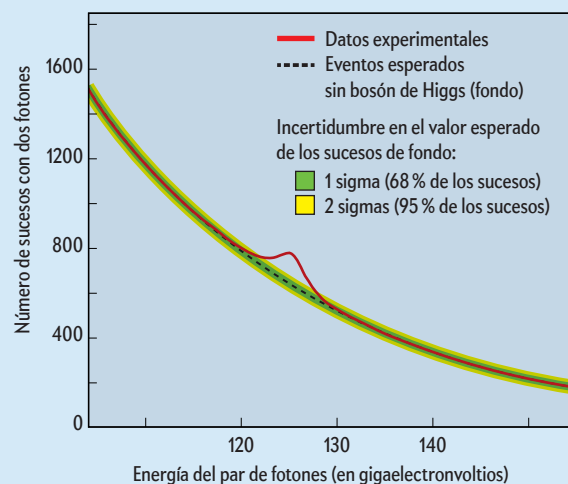
Sin embargo, aquí no acaba la historia. Un análisis riguroso requiere tener en cuenta el efecto conocido como «mirar en otros

PROCESOS DE FONDO

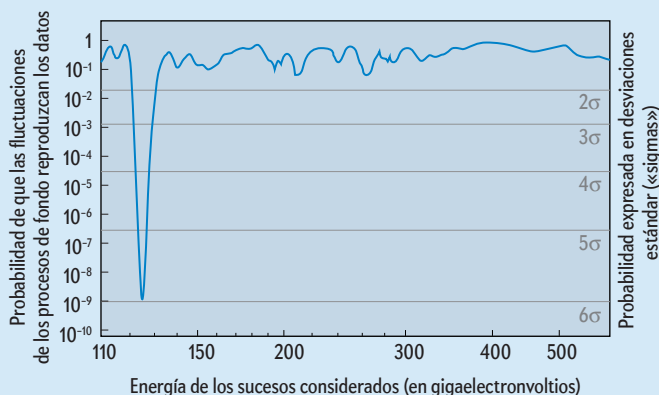
Una aguja en un océano de paja

El modelo estándar no predice la masa del bosón de Higgs. Pero, para cada valor posible de su masa, sí predice con qué probabilidad debería desintegrarse de una forma u otra: en dos fotones, en cuatro leptones, etcétera. Los físicos buscan esos productos de desintegración característicos entre todas las colisiones de protones registradas en el LHC.

Sin embargo, esos mismos productos pueden también originarse en una gran cantidad de procesos «de fondo» en los que no se produce ningún bosón de Higgs. Una parte esencial del análisis de datos consiste en contar todos los sucesos de un mismo tipo y compararlos con los se esperaba observar si solo hubiesen procesos de fondo. Un exceso de los primeros sobre los segundos podría constituir un indicio de la existencia del bosón de Higgs.



Esta gráfica muestra los sucesos con dos fotones registrados por el detector CMS (línea roja), así como los que se espera se deban solo a los procesos de fondo (línea punteada negra). Se observa un claro exceso de eventos cuando la energía de los fotones ronda los 125 gigaelectronvoltios, tal y como correspondería a la producción de bosones de Higgs con dicha masa.

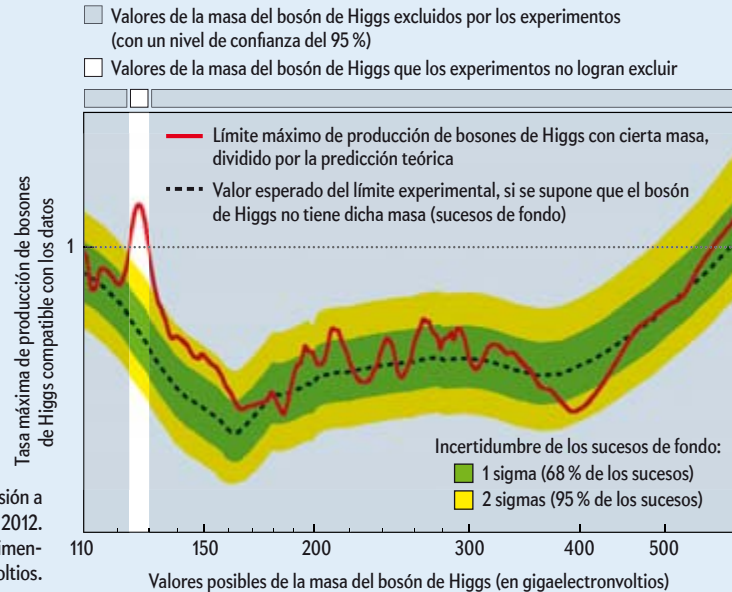


Los sucesos de fondo podrían fluctuar sobre su valor medio e imitar los efectos de un bosón de Higgs. Esta gráfica muestra la probabilidad de que las fluctuaciones en los procesos de fondo reproduzcan los datos que el detector ATLAS registró durante 2011 y 2012. Esa probabilidad cae bruscamente a casi de uno entre 600 millones (o 5,9 sigmas) cuando la energía de los sucesos asciende a unos 125 gigaelectronvoltios.

¿Dónde no está el bosón de Higgs?

Otra manera de analizar los datos consiste en determinar qué valores para la masa del bosón de Higgs quedan excluidos por los experimentos. Para cada valor supuesto de la masa del bosón de Higgs, se calcula el límite máximo de producción de la partícula que los datos pueden tolerar por encima de los procesos de fondo. Si dicho límite máximo es inferior a la predicción teórica de producción de bosones de Higgs con esa masa, su existencia queda descartada.

Esta gráfica muestra el resultado del análisis de exclusión a partir de los datos registrados por ATLAS durante 2011 y 2012. Solo existe un pequeño intervalo de masas que los experimentos no logran excluir: en torno a los 125 gigaelectronvoltios.



sitios» (o *look elsewhere effect*, en inglés). En realidad, en nuestros análisis buscamos algún exceso a lo largo de todo un intervalo de masas. Pero la probabilidad de que una fluctuación de fondo ocurra para un valor dado de la masa (el valor local de p_0 para esa masa) siempre será inferior a la probabilidad de que una fluctuación local aparezca en un valor *cualquiera* de todo el intervalo de masas investigado. Al considerar el espacio de masas comprendido entre 110 y 600 GeV, obtenemos que la probabilidad de que la señal de fondo genere un exceso similar al observado por ATLAS en un lugar cualquiera de ese intervalo asciende a uno entre 3 millones, equivalente a una confianza estadística de 5,1 sigmas.

CINCO SIGMAS

Hasta casi el último momento no tuvimos claro el mensaje final que arrojarían los datos. Los miembros de una colaboración tampoco conocíamos los resultados de la otra, si bien durante los días previos al seminario comenzaron a correr todo tipo de rumores. Durante las dos últimas semanas, las dos colaboraciones, cada una por separado, dimos el visto bueno a los resultados en reuniones casi diarias.

Como cabe imaginar, todos los miembros del equipo investigador siguen con gran interés un proceso así, por lo que los encuentros son multitudinarios. Cada uno, desde el más veterano hasta el estudiante más joven, puede tomar la palabra y es escuchado con atención. Resulta fundamental asegurarse de la validez de los análisis y de las conclusiones, así como disponer de una visión conjunta y común de todos los detalles. También debe comunicarse un mensaje científico adecuado, tanto a nuestros colegas de profesión como al gran público: uno preciso y claro, y que se atenga estrictamente a los resultados del trabajo. La complejidad y la solidez de este tipo de análisis no siempre resultan fáciles de transmitir. El viernes 29 de junio, el director del CERN y los portavoces de ambos experimentos se reunieron, con compromiso de confidencialidad, para contrastar sus respectivos resultados. El comunicado se afinó hasta el momento en que se envió al CERN (el martes 3 de julio, con embargo hasta el día siguiente).

Ese período, el más emocionante que hemos vivido hasta ahora en el LHC, concluyó a finales de julio con la publicación simultánea por parte de los dos experimentos de sus respectivos resultados: la observación, con una significancia estadística de 5 y 5,9 sigmas, de una nueva partícula subatómica en la región de masas de 125-126 GeV y cuyas propiedades resultan, por ahora, compatibles con las del bosón de Higgs. Pero ¿qué bosón de Higgs? ¿El postulado en el marco del modelo estándar, o una versión más exótica? Para responder a esta pregunta deberemos acumular muchos más datos sobre la nueva partícula y sus modos de desintegración. También se procederá a combinar los datos obtenidos por ATLAS y CMS, con el objetivo de alcanzar la máxima precisión posible y examinar la coherencia mutua entre sus respectivos resultados.

Las colisiones entre protones que aún se realicen en el LHC durante lo que queda de año quizá tripliquen la cantidad de datos acumulada hasta junio, lo cual permitirá afinar con una precisión mucho mayor el diagnóstico de la nueva partícula. Y, por supuesto, continuaremos buscando señales de nueva física. En febrero de 2013, el LHC iniciará una larga parada técnica a fin de realizar los ajustes necesarios para comenzar a finales de 2014 con colisiones a 13 TeV. Esto nos facultará para generar la nueva partícula en cantidades mucho mayores que ahora y, quizás, otras partículas de masas más elevadas. No se lo pierdan.

PARA SABER MÁS

- El bosón de Higgs. Martinus J. G. Veltman en *Investigación y Ciencia* n.º 124, enero de 1987.
- Los misterios de la masa. Gordon Kane en *Investigación y Ciencia* n.º 348, septiembre de 2005.
- ¿Está la partícula de Higgs asomando la cabeza? Alberto Casas en *Investigación y Ciencia* n.º 425, febrero de 2012.
- El descubrimiento del bosón de Higgs. Alberto Casas en *Investigación y Ciencia* n.º 431, agosto de 2012.
- Observation of a new particle in the search for the standard model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. Colaboración ATLAS, 31 de julio de 2012. Disponible en arxiv.org/abs/1207.7214
- Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC. Colaboración CMS, 31 de julio de 2012. Disponible en arxiv.org/abs/1207.7235
- Página web de las colaboraciones ATLAS y CMS: atlas.ch y cms.web.cern.ch