

### Costes de producción

Para evaluar los costes de generación de electricidad a partir de residuos hemos considerado la distribución geográfica del potencial, las inversiones necesarias y los gastos anuales de operación. Si bien los gastos de inversión pueden ser notables, el coste del combustible es nulo o incluso negativo (en función de cómo se atribuya el coste de acopio y transporte de los residuos hasta el punto de conver-

sión). De este modo, zonas con alta generación de residuos se benefician de una economía de escala y pueden generar energía a un precio inferior.

Al comparar los costes con la producción energética de las diversas estrategias se observa que la electricidad producida mediante digestión anaerobia resulta mucho más cara que el resto. Ello se debe a que esta técnica requiere una inversión muy superior: unos 3500-4250 euros por

kilovatio frente a los 1500-3000 euros por kilovatio del resto de sistemas. Por el contrario, la incineración y la desgasificación en vertederos son las que entrañan el menor coste energético.

—Norberto Fueyo,  
Antonio Gómez  
y César Dopazo  
Área de mecánica de fluidos  
Universidad de Zaragoza

### ALTAS ENERGÍAS

## El descubrimiento del bosón de Higgs

Los expertos aún deben determinar por completo su identidad, pero el hallazgo de la nueva partícula marca un hito histórico en la física teórica

El pasado 4 de julio, la comunidad internacional de física de partículas presenció uno de los anuncios científicos más trascendentales de las últimas décadas. Aunque el adjetivo «histórico» se emplea a menudo con frivolidad, en este caso su uso se encuentra plenamente justificado.

En dos seminarios consecutivos retransmitidos en directo desde el CERN, los portavoces de las colaboraciones CMS y ATLAS, los dos experimentos de mayor envergadura del Gran Colisionador de Hadrones (LHC), presentaron los resultados acumulados hasta el momento en favor de la existencia de una nueva partícula: el largamente buscado bosón de Higgs. El grado de certidumbre con el que puede afirmarse que se ha descubierto una nueva partícula resulta abrumador: en torno al 99,9999 por ciento, el nivel de fiabilidad que los físicos de partículas exigen para proclamar un «descubrimiento». Otra cuestión es si la partícula hallada se corresponde exactamente o no con el bosón de Higgs predicho por la teoría. Aunque esta pregunta aún tardará un tiempo en ser respondida con rotundidad, el hallazgo hecho público el 4 de julio marcará un antes y un después para la física de partículas.

El bosón de Higgs desempeña un papel clave en nuestra comprensión de las leyes físicas. Todo nuestro conocimiento sobre las partículas elementales queda englobado en el modelo estándar: un marco teórico que, en cierto modo, describe la naturaleza en su aspecto más básico, puesto que todo se compone de partículas. Un aspecto esencial de dicho modelo es el mecanismo que permite que las par-

tículas elementales posean masa. La masa de los objetos representa un concepto tan ordinario que, a menudo, olvidamos preguntarnos acerca de su origen. Sin embargo, resulta muy complicado diseñar un engranaje matemático que proporcione masa a las partículas y que, a la vez, respete los innumerables éxitos del modelo estándar en la descripción de las interacciones fundamentales.

La solución más ingeniosa propuesta hasta ahora es el mecanismo de Higgs, formulado en 1964 por Robert Brout y François Englert, y, algunos meses después, por Peter Higgs. Según esta idea, todo el universo se encuentra lleno de un campo invisible, el campo de Higgs, el cual podemos imaginar como un líquido transparente y ligeramente viscoso. La «fricción» de las partículas con este campo produce una resistencia a su movimiento, lo cual imita exactamente el efecto de una masa. Y los bosones de Higgs se corresponderían con las excitaciones de ese «fluido» que lo llena todo, como las olas en un estanque. Peter Higgs —aquí sí— fue el primero en sugerir su existencia.

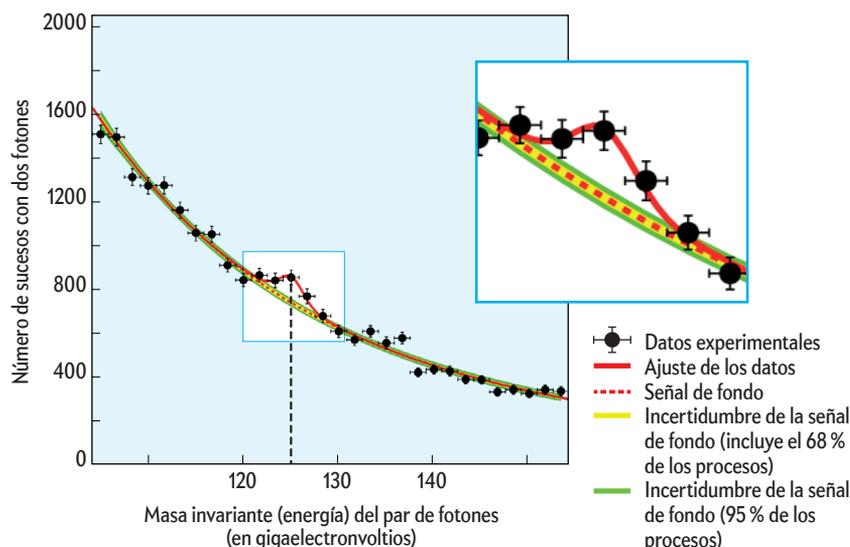
La idea supone un gran salto intelectual que, en cierto modo, recupera la antigua noción del éter, si bien de una forma del todo novedosa. Sin el mecanismo de Higgs, todo el edificio teórico del modelo estándar se vendría abajo. Curiosamente, algunos físicos hubieran preferido que los experimentos refutasen el mecanismo de Higgs. En tal caso, la naturaleza nos habría puesto ante el reto de descubrir su «truco» para otorgar masa a las partículas. Pero, por otro lado, resulta obligado reconocer el gran triunfo del ingenio humano que supone adi-

vinar los entresijos más profundos de las leyes físicas.

### Una aguja en un pajar

¿Qué pasos se han seguido para llegar a las conclusiones presentadas el 4 de julio? De manera esquemática, la manera de razonar ha sido la siguiente: si en algunas de las colisiones entre protones que se llevan a cabo en el LHC se produce una nueva partícula con características semejantes al bosón de Higgs, esta se desintegrará, casi instantáneamente, de formas diversas. Esas diferentes posibilidades se denominan canales de desintegración. Uno de los canales que deja una señal más clara en los detectores (aunque no es el más frecuente) es la desintegración en dos fotones. Los físicos de CMS y ATLAS han analizado todos los choques protón-protón en los que se han producido dos fotones energéticos y bien diferenciados.

El siguiente paso consiste en medir la energía y direccionalidad de cada par de fotones. Con esos datos puede obtenerse su «masa invariante»; es decir, la energía de los fotones según la mediría un observador imaginario que viajara montado en el centro de masas del sistema formado por los dos fotones. Si estos provienen de la desintegración de una partícula de masa  $M$ , entonces su masa invariante ha de coincidir con  $M$ . Sin embargo, hay una gran cantidad de colisiones entre protones en las que, sin necesidad de que se produzca ningún bosón de Higgs ni nada parecido, también se generan dos fotones. Por tanto, existe un ingente ruido de fondo sobre el que deben aislarse los pocos sucesos genuinos debidos a la desintegración de una nueva partícula.



A tal fin, se representan en una gráfica todos los sucesos en los que se han producido dos fotones para cada valor posible de la masa invariante  $M$ . Si solo existiese la señal de fondo, la gráfica mostraría un perfil suave, ya que no habría ningún valor de  $M$  privilegiado. Pero, si algunos fotones se han originado en la desintegración de una partícula de masa  $M$ , esperamos ver un *exceso* de sucesos en torno a dicho valor de  $M$ . Y eso es exactamente lo que se observa: un pico muy claro cuando la masa invariante del par de fotones ronda los 125 o 126 gigaelectronvoltios (unas 134 veces la masa de un protón).

Por sí solo, el resultado anterior no bastaría para proclamar un descubrimiento. Sin embargo, si la partícula realmente existe, en otras ocasiones se desintegrará mediante otros canales, por lo que en todos ellos deberíamos observar un exceso de sucesos en torno a la misma masa. De todos los canales adicionales, el más interesante corresponde a la desintegración en cuatro leptones: por ejemplo, en un par electrón-antielectrón más un par muon-antimuon. El análisis de este canal vuelve a mostrar un pico para (aproximadamente) el mismo valor de la masa invariante.

Dicho resultado refuerza el anterior hasta el punto de que eleva la confianza estadística hasta el nivel de «descubrimiento». Ello quiere decir que la probabilidad de que no haya ninguna partícula nueva y que, aun así, se observen tales picos en el lugar en el que aparecen (debido a una fluctuación estadística) resulta irrisoria: inferior a uno entre un millón. Además, contamos con dos experimentos independientes, ATLAS y CMS, los cuales operan con tecnologías distintas. Ambos

han detectado excesos similares en torno al mismo valor de la masa invariante, lo cual aumenta aún más la confianza estadística de cada resultado por separado. Parece claro que nos hallamos ante un verdadero descubrimiento.

#### ¿Es o no es?

¿Hasta qué punto podemos asegurar que la partícula descubierta se corresponde con el bosón de Higgs del modelo estándar? Esta cuestión ya no se deja responder con tanta claridad. En primer lugar, habría que demostrar que la partícula posee espín cero (que no gira sobre sí misma), lo cual constituye una predicción inequívoca de la teoría. Por el momento solo sabemos que tiene espín entero, ya que se desintegra en dos fotones, pero no podemos asegurar que su espín sea nulo.

Por otro lado, aún debemos comprobar que sus interacciones con el resto de las partículas coinciden con las predichas por el modelo estándar. Para ello hay que estudiar la frecuencia con la que se producen los presuntos bosones de Higgs, así como la probabilidad de desintegración de cada canal. Dichas probabilidades están directamente relacionadas con las interacciones entre el nuevo bosón y las diferentes partículas, y han sido calculadas con gran detalle para el Higgs del modelo estándar. Por tanto, comparar los valores teóricos con los experimentales supone un test clave para determinar la identidad de la partícula. Por ahora, sin embargo, la estadística no basta para clarificar este punto.

A juzgar por los datos, parece que en el canal con dos fotones hay más sucesos de los que debería, mientras que en otros canales (como la desintegración en tau-antitau) se han observado menos de los

En el LHC se hacen chocar protones a velocidades muy elevadas y se estudian las partículas producidas en las colisiones. Si se genera un bosón de Higgs, se sabe que este puede desintegrarse en dos fotones. Sin embargo, la misma señal puede provenir de un gran número de procesos «de fondo» que nada tienen que ver con el bosón de Higgs. Esta gráfica muestra los sucesos con dos fotones registrados por el experimento CMS frente a la señal de fondo esperada. El pico indica la existencia de fotones «de más»: una clara señal de que se han originado en la desintegración de una nueva partícula cuya masa ronda los 125 gigaelectronvoltios.

esperados. Con todo, el promedio de esas desviaciones con respecto a las predicciones teóricas no resulta muy elevado ni, de momento, significativo desde un punto de vista estadístico. Cabe señalar que esto no tendría por qué haber sido así: podríamos haber visto diez o cien veces más sucesos con dos fotones de lo previsto, o que la nueva partícula se desintegrara mediante canales prohibidos para el bosón de Higgs. Sin embargo, algo así no ha sucedido. Numerosos expertos sospechan que, a medida que dispongamos de más datos, estos irán convergiendo hacia las predicciones del modelo estándar.

En todo caso, aunque todavía no pueda confirmarse su identidad con una certeza absoluta, parece evidente que la nueva partícula guarda alguna relación con el mecanismo de generación de masa. Se trata por tanto de un descubrimiento que cierra una etapa histórica en la física de partículas —la del modelo estándar— y nos abre las puertas a otra nueva.

Aún quedan grandes cuestiones por resolver. ¿Por qué el campo de Higgs interactúa («fricciona») de forma distinta con cada especie de partícula, otorgándoles así masas diferentes? ¿Cuál es la naturaleza de la materia oscura, la misteriosa sustancia que compone el 80 por ciento de toda la materia presente en el universo? Puede que algunas de estas preguntas hallen respuesta en el LHC durante los próximos años. Todos deseamos que la racha continúe.

Para terminar, una apuesta (fácil): este año el Nobel de Física será concedido a François Englert y Peter Higgs. Por desgracia, Robert Brout falleció el año pasado.

—Alberto Casas  
Instituto de Física Teórica  
Universidad Autónoma de Madrid/CSIC