

NOVEDADES CIENTÍFICAS EN 2008

EN FÍSICA

INFORMACIÓN CUÁNTICA EN FORMA DE LUZ

Hace varios años se consiguió retrasar un haz de luz en un gas de átomos; manipulando los espines de los átomos, la energía e información contenida en la luz pudo ser transferida a los átomos del gas de modo coherente. Luego, mandando haces de láser adicionales la señal de luz original podía ser reconstruida y reenviada de nuevo en su camino. Ahora, un grupo Harvard dirigido por Lene Hau han parado y almacenado una señal de luz en un condensado de Bose-Einstein (BEC) de átomos de sodio. Después han transferido la señal en forma de un pulso coherente de ondas de átomo (en lugar de ondas luminosas) hacia un segundo BEC de átomos de sodio, aproximadamente a unas 160 micras de distancia, desde el cual, finalmente, la señal es revivida como un pulso convencional de luz. Esta hazaña de poder compartir información cuántica en forma de luz representa un gran estímulo a los que esperan desarrollar ordenadores cuánticos (Ginsberg *et al.*, *Nature*, **445**, 623, (2007)).

EL EFECTO CASIMIR TAMBIÉN “SE CALIENTA”

Por primera vez, un grupo dirigido por el laureado Nobel Eric Cornell en el National Institute of Standards and Technology (NIST) y la Universidad de Colorado en Boulder ha confirmado una predicción del año 1955, formulada por el físico Evgeny Lifschitz, que afirma que la temperatura afecta a la fuerza de Casimir –la fuerza de atracción entre dos objetos cuando se aproximan a una distancia inferior a 5 millonésimas de metro. En este trabajo los investigadores estudiaron la fuerza de Casimir-Polder, esto es, la atracción entre un átomo neutro y una superficie próxima. El grupo de Colorado envió átomos de rubidio ultra-fríos hacia una superficie de cristal hasta aproximarlos a una distancia inferior a unas pocas micras. Al duplicar la temperatura del cristal hasta 600 K manteniendo la temperatura del entorno próxima a la temperatura ambiente,

la fuerza atractiva del cristal aumentó, confirmando por tanto las predicciones teóricas hechas recientemente por coautores del grupo en Trento, Italia. La fuerza de Casimir surge de los efectos del vacío. De acuerdo con la mecánica cuántica, el vacío contiene ondas electromagnéticas efímeras, lo que en definitiva consiste en campos eléctricos y magnéticos. Los campos eléctricos pueden reordenar ligeramente la carga en los átomos y de esta forma, los átomos polarizados pueden experimentar la fuerza de un campo eléctrico. Los campos eléctricos del vacío son alterados por la presencia del cristal, creando una región de máximo campo eléctrico que atrae los átomos. Además, el calor interno del cristal también afecta a las fugaces ondas electromagnéticas, algunas de las cuales llegan a la superficie en forma de “ondas evanescentes”. Estas ondas evanescentes crean un campo eléctrico máximo en la superficie atrayendo todavía más a los átomos. En condiciones normales, las ondas electromagnéticas procedentes del calor en el resto del entorno cancelarían la atracción térmica de la superficie de cristal. Sin embargo, al cambiar únicamente la temperatura del cristal se desequilibra el balance en favor de las fuerzas térmicas del vidrio aumentando la atracción entre la pared y los átomos (Obrecht *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **98**, 063201, (2007)).

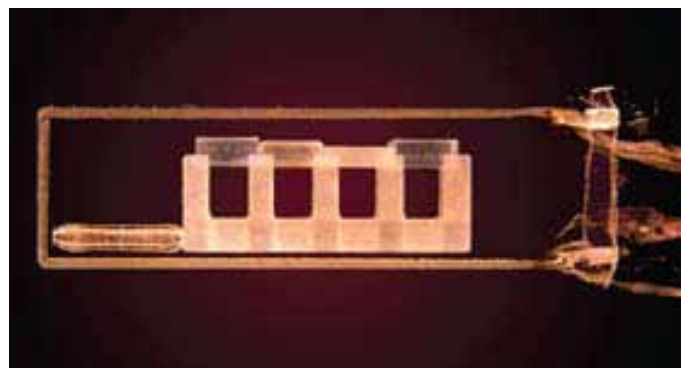


Figura 1. Imagen del dispositivo.

MAGNETORRESISTENCIA CUANTIZADA

La conversión de un diminuto flujo magnético en un cambio en la resistencia de un circuito externo, fenómeno conocido como magnetorresistencia, es el proceso fundamental sobre el que se desarrolla la industria de los discos duros magnéticos. Los datos digitales son almacenados en el disco en forma de minúsculos dominios de tamaño lateral 50 por 200 nm, representando un 1 o un 0, y leídos por un sensor que se mueve a unos 10 nm del disco. Físicos de la Universidad de Nebraska

y del Institut de Physique et de Chimie des Materiaux de Strasbourg (Francia) han observado por primera vez de forma clara la versión cuántica de la magnetorresistencia: la variación en la resistencia medida por el sensor cambia de forma discreta a medida que la orientación de la magnetización relativa al sensor varía. La cuantización de la conductancia en el lado del sensor fue conseguida estrechando el flujo de corriente hasta el tamaño de un único átomo, lo que impone condiciones cuánticas. Según el científico de Nebraska Andrei Sokolov, al atomizar el punto de contacto se consigue un proceso de lectura-escritura mucho más compacto desde el punto de vista físico, permitiendo un almacenamiento de datos mucho mayor (Sokolov *et al.*, *Nature Nanotechnology*, 2, 171, 2007).

¿QUÉ HACE ÚNICO AL PLUTONIO?

Una nueva teoría explica algunas propiedades insólitas del plutonio, el metal radiactivo más conocido por su facilidad para sufrir reacciones de fisión nuclear en cadena, convirtiéndolo en un potente combustible para centrales eléctricas. El plutonio es uno de los metales más raros –no es magnético y no conduce bien la electricidad. También cambia dramáticamente su tamaño con variaciones muy pequeñas de temperatura y presión. Este inusual conjunto de propiedades le distingue claramente incluso de sus vecinos más próximos en la tabla periódica, como por ejemplo el americio. Para explicar esta rareza, una nueva teoría ha sido desarrollada por especialistas en materia condensada de la Rutgers University en New Jersey. En ella, los ocho electrones más externos (electrones de valencia) pueden circular entre diferentes regiones (orbitales) alrededor del átomo. El orbital 5f del plutonio es el que tiene mayor influencia sobre sus propiedades atómicas. Según la teoría, el número de electrones de valencia que contiene es muy a menudo cinco (aproximadamente el 80% del tiempo), pero también puede ser seis (alrededor del 20% del tiempo) o cuatro (menos del 1% del tiempo). Los investigadores creen que estos electrones transitan dentro y fuera del orbital 5f muy rápidamente –del orden de femtosegundos, 10^{-15} s. El plutonio es un ejemplo de material fuertemente correlacionado, con un alto grado de interacción entre los electrones de valencia por lo que no pueden ser tratados como agentes independientes. Teniendo en cuenta estas interacciones, los investigadores combinaron en un sofisticado análisis dos aproximaciones teóricas clásicas en estado sólido, la aproximación de densidad local y la teoría dinámica

de campo medio. Como se muestra en su análisis, el orbital 5f determina muchas de las propiedades claves del plutonio, como su carencia de conductividad y magnetismo. Con su teoría, los investigadores también han explicado las propiedades magnéticas y eléctricas de americio y curio, y esperan que esta teoría también aclare las propiedades de otros elementos de la tabla periódica conocidos como “tierras raras” (Shim *et al.*, *Nature*, 446, 513, (2007)).

EL TUNNELING DE ELECTRONES EN ÁTOMOS HA SIDO OBSERVADO POR PRIMERA VEZ EN TIEMPO REAL

Este hito ha sido conseguido por un equipo germano-austríaco-holandés (Ferenc Krausz, Max Planck Institute of Quantum Optics, y Ludwig Maximilians, University of Munich) usando pulsos de luz con una duración de sólo varios cientos de attosegundos (10-18 s). El proceso de tunneling es la base del funcionamiento de ciertos dispositivos electrónicos como los microscopios de efecto túnel (scanning tunneling microscopes), los diodos de Esaki, o los láseres de cascada cuántica, entre otros muchos. En la fisión nuclear, por ejemplo, las partículas alfa escapan del núcleo que se fractura por tunneling. El mismo efecto permite la emisión de partículas alfa durante la desintegración radiactiva de algunos núcleos atómicos. El proceso de tunneling ocurre tan rápidamente –en escalas de attosegundos– que no había sido posible observarlo directamente. Sin embargo, esto es ahora posible gracias a la capacidad demostrada por los autores del trabajo de crear pulsos de luz en la escala del attosegundo. En el nuevo experimento, un gas de átomos de neón es expuesto a dos pulsos de luz. Por un lado, un pulso intenso que contiene fotones rojos de baja energía; por otro, un segundo pulso de luz ultravioleta de duración del attosegundo. Este pulso ultravioleta contiene fotones tan energéticos que pueden arrancar un electrón y “promocionar” un segundo electrón a la periferia del átomo, llevándolo a un estado cuántico excitado. Entonces, el pulso rojo, que consiste solamente en unos pocos ciclos de onda, tiene la posibilidad de liberar el electrón periférico vía un fenómeno conocido como tunneling inducido por luz. Los investigadores observaron este fenómeno, predicho teóricamente hace cuarenta años, pero sólo verificado experimentalmente ahora por primera vez. A medida que cada cresta de la onda del pulso rojo llegaba a los átomos del gas, la probabilidad de escape por tunneling de los electrones externos

umentaba hasta que llegaba aproximadamente al 100%. Los datos indican que, en este sistema particular, los electrones se escapan vía tunneling en tres pasos discretos, sincronizados con las tres crestas de onda más intensas situadas en el centro de la onda del pulso rojo. Cada paso dura menos de 400 attoseconds (Uiberacker *et al.*, *Nature*, **446**, 627, (2007)).

IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA NUCLEAR CON RESOLUCIÓN DE 90 nm

Esta resolución ha sido lograda por John Mamin y sus colegas del IBM Almaden Lab en San José, California. El método utilizado –llamado *magnetic resonance force microscopy* (MRFM)– consiste en realizar un mapeo en pequeñas escalas de la posición de la materia en una muestra a partir de la vibración resonante de una delgada varilla de silicio –o *cantilever*– que porta la muestra en cuestión (ver Figura 2), cuando es expuesta a ondas de radiofrecuencia y explorada sobre una diminuta punta magnética. Previamente, este mismo grupo de físicos había usado un sistema similar para descubrir la resonancia magnética de un único electrón desapareado. Ahora, sin embargo, han detectado la resonancia magnética de núcleos, mucho más difícil ya que el magnetismo nuclear es mucho más débil que el magnetismo de electrones (en el caso de hidrógeno, por ejemplo, aproximadamente 660 veces más débil). La ventaja de centrarse en el magnetismo nuclear reside en que la respuesta de varios átomos muy importantes desde un punto de vista biológico y tecnológico como el H, el P, el C-13 o el F puede ser claramente diferenciada. Anteriormente, la resolución máxima alcanzada era del orden de la micra. Ahora, la nueva imagen por MRFM explora volúmenes tan pequeños como 650 zeptolitros (10^{-21} litros), que es aproximadamente unas 60.000 veces mejor que lo que puede conseguir la mejor MRI convencional. Las mejoras fueron conseguidas por el uso de bajas temperaturas (reduciendo de este modo cualquier movimiento del cantilever inducido térmicamente) y el empleo de puntas magnéticas muy finas, lo cual mejora la fuerza magnética debido a los espines. El gradiente de campo magnético en los alrededores de esta punta es mayor que un millón de tesla/metro. Los objetos de prueba consistieron en diminutas islas de fluoruro de calcio evaporado sobre la punta del cantilever. Se pudo comprobar que islas muy cercanas, con un tamaño aproximado de $300 \text{ nm} \times 180 \text{ nm} \times 80 \text{ nm}$, podrían ser claramente resueltas. Uno de los investigadores, Dan Rugar, dice

que los diminutos volúmenes de la muestra analizada contienen cerca de 10 millones de espines nucleares, y que la polarización nuclear neta que ellos consiguen detectar asciende a 3.300 espines aproximadamente. El cree, sin embargo, que su dispositivo actual puede observar el magnetismo nuclear hasta un nivel de 200 espines. Esto les llevaría mucho más cerca de su objetivo último, tomar imágenes de moléculas a nivel del espín nuclear individual (Mamin *et al.*, *Nature Nanotechnology*, **2**, 301, (2007)).

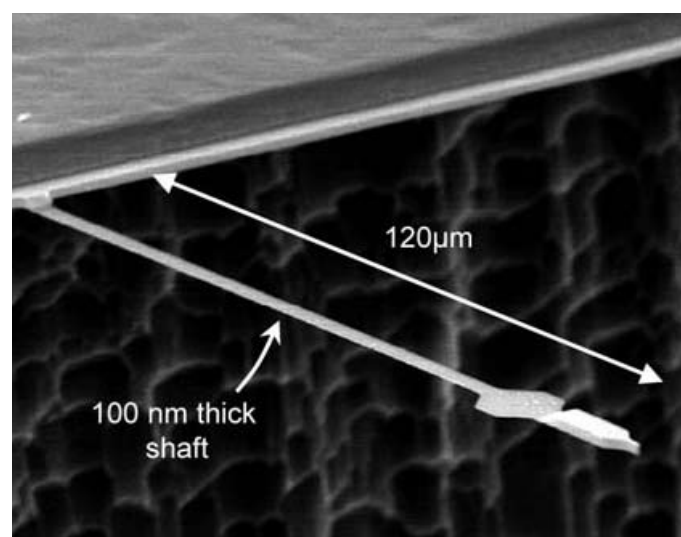


Figura 2. Detalle del dispositivo.

CORRECCIÓN A LA NUCLEAR DRIPLINE

Se han descubierto nuevos isótopos pesados, al menos uno de los cuales se sale de la *nuclear dripline*. Se denominan *driplines* a los bordes externos que definen la zona de núcleos ligados –observados o esperados– sobre un mapa cuyo eje horizontal es el número de neutrones en el núcleo (N) y cuyo eje vertical corresponde al número de protones (Z). La fuerza nuclear que mantiene ligados a neutrones y protones a pesar de la repulsión electrostática entre los protones –misma carga– es tan fuerte que ninguna teoría puede predecir con seguridad si una combinación particular de neutrones y protones formará un núcleo ligado. Esta respuesta sólo se puede encontrar en el laboratorio. En un experimento realizado recientemente en el National Superconducting Cyclotron Lab (NSCL), Michigan State University, un haz de iones de calcio fue lanzado hacia un objetivo de tungsteno. Como consecuencia del choque surgió una multitud de diferentes núclidos que fueron recogidos en un

detector para su identificación. A pesar de que se encontraron dos núclidos nuevos, Mg-40 y Al-43, la sorpresa llegó con el Al-42, un núclido insólito que violaba la prohibición provisional contra los núcleos de este tamaño que tienen un número impar de protones y neutrones. A pesar de que los nuevos núclidos observados no son estables y decaen en unos pocos milisegundos, estos tiempos son bastante grandes para los estándares nucleares. ¿Por qué estudiar estos núcleos tan efímeros? A pesar de que pudieran no existir de forma natural, los nuevos núclidos podrían desempeñar un papel importante dentro de estrellas o novas donde se crean los elementos pesados, incluyendo aquellos que constituyen nuestro planeta y nuestros cuerpos. Thomas Baumann cree que podrían existir isótopos de aluminio aún más pesados. En su opinión, vale la pena explorar cualquier posible isla de estabilidad, no sólo aquellas en el borde mismo de la tabla periódica (Baumann *et al.*, *Nature*, **449**, 1022, (2007)).

EL ORIGEN DE LOS RAYOS CÓSMICOS MÁS ENERGÉTICOS

Científicos que trabajan en el Pierre Auger Observatory (Argentina) han llegado a la conclusión de que los rayos cósmicos más energéticos proceden probablemente del centro de núcleos galácticos activos (*active galactic nuclei* AGN), donde se cree que agujeros negros supermasivos suministran una energía enorme para arrojarlos a través del cosmos. El observatorio Pierre Auger consiste en un descomunal dispositivo de detectores que se extiende través de 3.000 km² con un sólo objetivo: detectar cascadas de rayos cósmicos (*cosmic ray showers*). Los rayos cósmicos están compuestos de partículas subatómicas extremadamente energéticas que al golpear nuestra atmósfera producen una cascada de partículas secundarias. El origen de los rayos cósmicos aún no está claro. Muchos de los rayos vienen de dentro de nuestra propia Vía Láctea, sobre todo de nuestro Sol, pero muchos otros vienen de muy lejos. Los más interesantes son aquellos con las energías más altas, alrededor de 10¹⁹ electron-voltios, una energía mucho más alta que la de cualquier partícula que pueda ser producida en los aceleradores terrestres. El origen de un artefacto físico tan potente representa una buena oportunidad para los físicos de estudiar los fenómenos más violentos del Universo. Para llegar a la Tierra, muchos de los rayos cósmicos habrán atravesado una gran región de espacio intergaláctico, donde los campos

magnéticos pueden desviarlos de sus trayectorias de partida. Sin embargo, en el caso de los rayos de energías más altas, los campos magnéticos no pueden ejercer tanta influencia y por consiguiente se puede trazar su punto de partida con alguna confianza. Esto permitió a los científicos de Auger afirmar que los rayos cósmicos más energéticos no venían uniformemente desde todas las direcciones, si no más bien desde galaxias de núcleo activo, donde el motor para la aceleración de las partículas deben ser probablemente agujeros negros de enorme tamaño. Al caer la materia a la ergosfera del agujero negro y éste rotar velozmente, parte de tal materia es lanzada a enormes velocidades debido a la fuerza centrífuga, en forma de protones y neutrones; al alcanzar la Tierra (u otros planetas con atmósferas lo suficientemente densas) sólo llegan los protones que caen en cascadas de rayos cósmicos tras chocar contra las capas superiores atmosféricas. Tal y como muestran en su trabajo, las lluvias más energéticas –con energías mayores que 57 EeV (1EeV = 10¹⁸ eV)– se correlacionan muy bien con AGN conocidos como, por ejemplo, la galaxia cercana de Centaurus. Se trata de un espectacular descubrimiento que probablemente inaugure una nueva rama de la Astronomía (Auger collaboration, *Science*, **9** (November 2007): Vol. 318, No. 5852, pp. 938-943).

PARES DE COOPER EN AISLANTES

Los pares de Cooper son enlaces extraordinarios que se generan entre dos electrones de un metal. A pesar de tener la misma carga, y por tanto experimentar una fuerza de repulsión eléctrica, se comportan como si se atrajeran debido a que interactúan a través de la red cristalina formada por los iones positivos del metal. Tal y como mostró Leon Cooper, el físico al que deben su nombre, una pequeña atracción arbitraria entre dos electrones de un metal puede producir un estado que tiene menor energía que la energía de Fermi, lo que implica que el par está ligado. Este estado es el responsable de la superconductividad y en los superconductores normales esta extraña atracción es debida a la interacción electrón-fonón. La atracción entre los electrones libres y los iones positivos que forman la rígida red cristalina puede deformar esta red de tal forma que el electrón puede atraer indirectamente otros electrones (interacción electrón-fonón). A distancias grandes, esta atracción entre electrones producida por los iones desplazados puede superar a su repulsión y dar lugar a un par de Cooper. A pesar

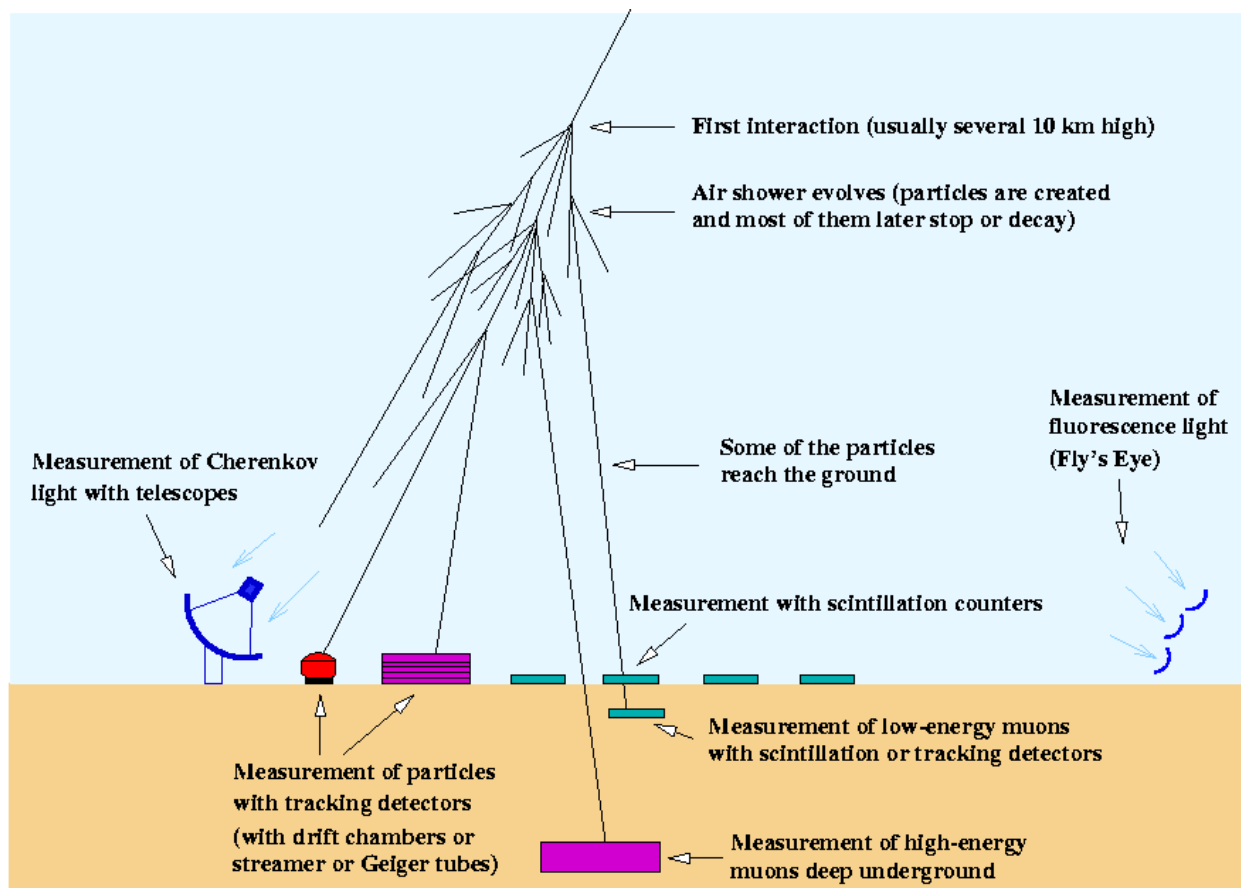


Figura 3. Detección de cascadas de rayos cósmicos y de rayos gamma en la atmósfera.

de estar directamente asociados a la superconductividad, por primera vez han sido observados en un material que no sólo no es superconductor, si no que es en realidad un aislante. Un experimento en la Universidad de Brown ha medido la resistencia eléctrica en una "tabla" de átomos de bismuto con forma de "queso suizo" que fue creado al rociar con una nube de átomos un sustrato con agujeros (de anchura 27 nm) y espaciados 100 nm. Las películas de bismuto fabricadas de este modo son superconductoras si la muestra tiene un espesor de muchas capas de átomos, pero son aislantes si el espesor es de unas pocas capas, debido a sutiles efectos que provienen de la geometría restrictiva. En el caso superconductor los pares de Cooper están presentes y se organizan para formar una supercorriente no resistiva, pero ¿cómo saben los investigadores que los pares también están presentes en el aislador? La respuesta de los investigadores fue estudiar qué pasa con la resistencia cuando el campo magnético externo es aumentado. La resistencia debería variar periódicamente, con un período propor-

cional a la carga de los objetos eléctricos en cuestión. De la periodicidad, proporcional en este caso a dos veces la carga del electrón, los físicos de Brown pudieron deducir que ellos veían objetos doblemente cargados que se movían por la muestra. En otras palabras, los pares de Cooper estaban presentes en el aislante. Esto es así sólo en las temperaturas más bajas. Uno de los investigadores, James Valle, afirma que la realización de un aislador bosón (en el cual los portadores de carga son pares de electrones) ayudará a explorar aún más el "raro" parentesco entre aislantes y superconductores (Stewart *et al.*, *Science*, **23** (November, 2007): Vol. 318. no. 5854, pp. 1273-1275).

TERMODINÁMICA RELATIVISTA

La teoría especial de la relatividad de Einstein contiene fórmulas, denominadas transformaciones de Lorentz, que relacionan los intervalos de tiempo o espacio medidos por dos observadores, uno situado en un sistema de referencia en

reposo mientras que el otro se mueve con velocidad constante respecto del primero, pudiendo ser esta velocidad muy próxima a la de la luz. ¿Y qué pasa con la temperatura?, es decir, ¿qué ocurre si el observador que se mueve lleva un termómetro con él y trata de medir la temperatura de un gas en una botella inmóvil?, ¿qué temperatura medirá? Un nuevo enfoque a esta discutida cuestión sugiere que la temperatura debe ser la misma para los dos observadores. En otras palabras, los cuerpos que se mueven no aparecerán más calientes o más fríos. Uno podría pensar que este problema debería haber sido resuelto hace décadas, pero sorprendentemente no es así. El primer problema surge en cómo definir o medir la temperatura de un gas. En 1866 James Clerk Maxwell enunció su famosa fórmula la cual predice que la distribución de velocidades de las partículas de un gas se parecería a una curva Gaussiana, pero ¿cómo sería esta curva para alguien que pasa al lado del gas a una cierta velocidad?, ¿cuál sería el equivalente de la temperatura promedio del gas para este otro observador? Jorn Dunkel y sus colegas de la Universitat Augsburg (Alemania) y de la Universidad de Sevilla (España) no podían hacer medidas directas exactas (resulta imposible mantener un gas a velocidades relativistas en un laboratorio terrestre), pero sí que realizaron extensas simulaciones de la medida. Dunkel dice que algunos sistemas astrofísicos podrían, eventualmente, ofrecer una posibilidad para validar experimentalmente la cuestión. En general, el esfuerzo para casar la termodinámica con la relatividad especial está todavía en una etapa temprana y no se sabe exactamente cómo cambian los diferentes parámetros termodinámicos en altas velocidades. En opinión de los autores del trabajo, el cero absoluto siempre será el cero absoluto, aún para observadores que se mueven muy rápidamente. Sin embargo, la obtención de las transformaciones Lorentz para otras cantidades como la entropía será costoso de conseguir (Cubero *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 170601, (2007)).

RASGANDO FLUIDOS

Una diferencia fundamental entre un sólido y un líquido es que si atravesamos el primero con un cuchillo, las dos partes de la hendidura permanecerán separadas, mientras que en el caso del líquido fluirán hasta unirse. Sin embargo, casi siempre la naturaleza proporciona materiales y procesos que no encajan en esas categorías tan claramente diferenciadas. Joseph Gladden (Universidad de Mississippi) y Andrew Belmonte (Penn

State) ha ideado un experimento en el que arrastran un cilindro por una mezcla del agua, jabón y ciertas sales –una especie de gel viscoelástico que es fluido a las temperaturas del ensayo. Para pequeñas velocidades de arrastre, el material se va cerrando por detrás del paso del cilindro como lo haría un líquido. Para velocidades más altas, el cilindro crea una hendidura y el material "cicatriza" más lentamente. Sin embargo, cuando las velocidades son suficientemente altas el fluido actúa como un sólido, al menos durante un momento; la sustancia se rasga en varias partes exhibiendo "grietas" que emanan de la estela del cilindro y que necesitan algunas horas para cerrarse. Gladden dice que el diagrama de fase (velocidad vs diámetro del cilindro) para el fluido muestra tres regiones: flujo, rasgadura "modesta", y rasgadura "rotunda". En opinión de los autores este tipo de diagrama de fase podría ayudar al entendimiento de otros fenómenos relacionados con materiales viscoelásticos (*Phys. Rev. Lett.*, **98**, 224501 (2007)).

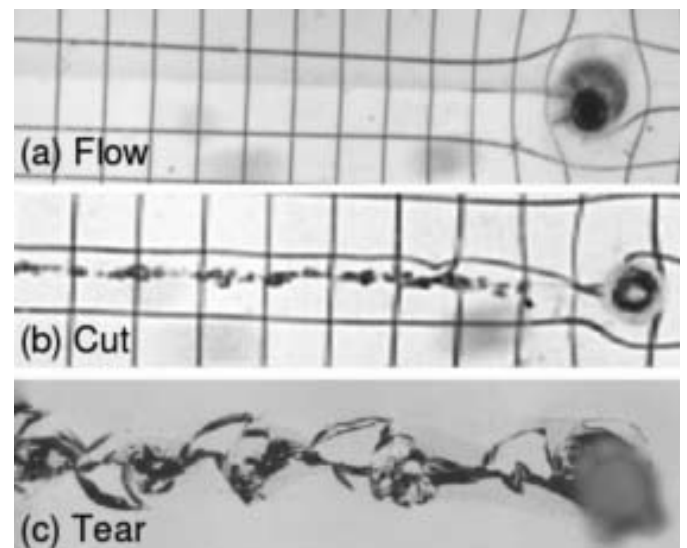


Figura 4. Regiones del diagrama de fase (velocidad vs diámetro del cilindro) en el experimento diseñado por Gladden y Belmonte para estudiar los materiales viscoelásticos.

PUERTAS LÓGICAS TÉRMICAS

El tratamiento de la información en los ordenadores es llevado a cabo principalmente en dispositivos electrónicos compactos que usan el flujo de electrones tanto para llevar como para controlar la información. Sin embargo, hay otros portadores potenciales de la información, como son los fotones. De este hecho se han dado cuenta los investigadores y ya hay

una importante industria que trabaja en el envío de mensajes codificados mediante pulsos de luz, es la fotónica. En opinión de Baowen Li de la Universidad Nacional de Singapur, los pulsos de calor, o fonones, que se mueven por un cristal, también podrían convertirse en importantes portadores de información. Li y su colega Lei Wang han mostrado cómo se podría usar el calor –un modo de energía ya presente en abundancia en dispositivos electrónicos– para llevar y tratar la información en los circuitos eléctricos. Los autores de la investigación sugieren que se podrían combinar transistores térmicos para todos los tipos de puertas lógicas (OR, AND, NOT, etc.) usados en los procesadores convencionales y que por lo tanto deberían ser posibles ordenadores térmicos que manipularan el calor en el nivel microscópico. Teniendo en cuenta que los rectificadores térmicos en estado sólido fueron demostrados experimentalmente en nanotubos por un grupo de Berkeley UC (Chang *et al.*, *Science*, el 17 de noviembre de 2006) sólo unos años después de la propuesta teórica del «diodo térmico» –el análogo en calor de un diodo eléctrico que obliga al calor a fluir preferencialmente en una dirección (Li *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **93**, 184301 (2004), Li está convencido de que los dispositivos térmicos podrán ser creados satisfactoriamente en un futuro razonable (Wang and Li, *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 177208, (2007)).

ONDAS GRAVITACIONALES DE FONDO

En el modelo estándar de la cosmología, el universo temprano sufrió un período de espectacular crecimiento. Esta fase inflacionaria concluyó, tan sólo 10^{-12} s después del *big bang*, con una violenta conversión de energía en materia caliente y radiación. Este proceso de «recalentamiento» también causó una inundación de ondas gravitacionales. Mientras que las ondas gravitacionales de fondo (*gravitational wave background*, GWB) fueron creadas en este momento (como hemos dicho, aproximadamente 10^{-12} s después del *big bang*), la radiación de fondo de microondas (*cosmic microwave background*, CMB) data de unos 380.000 años después, cuando se formaron los primeros átomos. El GWB se deriva de tres procesos de producción diferentes. En primer lugar, ondas procedentes de la propia expansión inflacionaria del espacio; en segundo, ondas provocadas por la colisión de burbujas de nueva materia durante la etapa de recalentamiento, después de la inflación cósmica; y por último, ondas provocadas por la turbulenta mezcla fluida de materia y radiación, antes de que

el equilibrio entre ambas –conocido como termalización– fuera alcanzado. Las ondas de gravedad nunca habrían estado en equilibrio con la materia ya que la gravedad es una fuerza tan débil que no habría habido tiempo suficiente para mezclarse adecuadamente. Un trabajo de Juan García-Bellido y Daniel Figueroa (Universidad Autónoma de Madrid) explica como estos procesos separados podrían ser descubiertos y diferenciados en los modernos detectores instalados para ver ondas de gravedad, como LIGO, LISA, O BBO (*Big Bang Observer*). En primer lugar, el GWB estaría desplazado hacia el rojo (*redshifted*), como el CMB. Sin embargo, debido a la procedencia más temprana del GWB, el corrimiento sería aún más dramático: la energía de las ondas estaría desplazada por debajo unos 24 órdenes de magnitud. En segundo, las ondas del GWB serían distintas de las ondas de gravedad procedentes de puntos fuente (como la colisión de dos agujeros negros) ya que tal encuentro liberaría ondas con una señal espectral más aguda. Por el contrario, el GWB procedente del recalentamiento después de la inflación tendría un espectro mucho más amplio, centrado alrededor de 1 hercio hasta 1 gigahercio dependiendo de la escala de inflación. García-Bellido sugiere que si un detector como el BBO pudiera desenmarañar las señales separadas del GWB correspondientes al final de la inflación, esa señal podría ser usada como una sonda de inflación y podría ayudar a explorar algunas cuestiones fundamentales como la asimetría de la materia-antimateria, la producción de defectos topológicos como cuerdas cósmicas, los campos magnéticos primordiales y la posible materia oscura superpesada. (García-Bellido and Figueroa, *Phys. Rev. Lett.*, **98**, 061302 (2007)).

INAUGURADO EL LHC: COMIENZA LA BÚSQUEDA DE LA PARTÍCULA DE DIOS

El pasado 10 de septiembre de 2008 se puso en funcionamiento el Large Hadron Collider (LHC), en castellano algo así como el “Gran Colisionador de Hadrones”. Se trata del acelerador de partículas más grande y potente del mundo. Básicamente consiste en un túnel en forma de anillo de 27 km de circunferencia que se encuentra cerca de Ginebra, en la frontera franco-suiza, a una profundidad que oscila entre 50 y 150 metros bajo tierra. Sobre este túnel se ha instalado un increíble dispositivo cuya función es acelerar protones e iones de plomo hasta velocidades cercanas a la luz (99,999999%), y en unas condiciones de vacío comparables al espacio interestelar. Se trata

de un prodigio de la ingeniería con unas cifras que asombran y cuyas perspectivas parecen no tener límite –hasta el punto que su puesta en funcionamiento ha suscitado predicciones catastrofistas dentro del propio sector científico. El LHC ha sido construido y será gestionado por la Organización Europea para la Investigación Nuclear, más conocida por su antiguo nombre en francés *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire* (CERN), y ha contado con la colaboración de unos 10.000 científicos e ingenieros de unos 100 países.



Figura 5. Localización del LHC.

Y todo esto, ¿para qué? Es muy simple. ¿Cuál es la primera idea que se nos ocurre cuando queremos conocer el interior de un objeto? Sencillamente romperlo, y cuanto más fuerte, mejor. El objetivo de un acelerador de partículas no es otro que ése, provocar choques frontales entre partículas a unas energías tan altas que permitan romper la materia hasta obtener sus constituyentes fundamentales (o su expresión energética, puesto que a estas velocidades la física es relativista y los conceptos de masa y energía se confunden). En física teórica, a estos constituyentes fundamentales se les denomina *partículas elementales*, y por definición, no están formadas por partículas más simples en interacción. Tal y como su nombre indica, El LHC se ha diseñado para colisionar fundamentalmente *hadrones* y más concretamente protones. Los hadrones son partículas subatómicas pero no elementales, pues están compuestos de *quarks*, *antiquarks* y *gluones*, que sí lo son. Tienen la particularidad de que experimentan la interacción nuclear fuerte, es decir, aquella

fuerza que permite que la gran mayoría de los núcleos atómicos, compuestos de hadrones (neutrones y protones), sean estables a pesar de la repulsión eléctrica entre los protones, por tener una carga del mismo signo.

La principal misión del LHC será testar el *Modelo Estándar* de la física de partículas, especialmente en condiciones de muy altas energías. El Modelo Estándar surge de la búsqueda de la *Teoría de la Gran Unificación* (GUT), el “Santo Grial” de la física teórica, y cuyo objetivo es unificar en una sola descripción tres de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza: la fuerza electromagnética, la nuclear fuerte y la nuclear débil. Esta teoría unificada deja fuera, por el momento, la fuerza gravitatoria, que actúa en escalas y tamaños tan grandes en comparación con aquellas típicas de la física de las partículas que por el momento hace muy lejano pensar en una *Teoría del Todo*, aunque es evidente que este es el objetivo último. Con el término *unificar* se hace referencia a la búsqueda de una única descripción que prediga y relacione estas tres interacciones fundamentales entre partículas elementales y de la cual se puedan deducir a partir de *primeros principios* todas las otras leyes que conocemos. De este modo, las otras leyes que conocemos serían casos especiales. Un ejemplo típico de unificación en física nos lo proporcionó Maxwell. Este físico escocés demostró que la electricidad, el magnetismo y la luz, fenómenos que hasta el momento habían sido tratados de forma diferente, son manifestaciones del mismo fenómeno: el campo electromagnético, y desarrolló una descripción consistente –teoría electromagnética– formalizada matemáticamente –ecuaciones de Maxwell– que sintetizaba todas las observaciones, experimentos y leyes sobre electricidad, magnetismo y óptica. Desde ese momento, todas las otras leyes y ecuaciones clásicas de estas disciplinas se convirtieron en casos simplificados de las ecuaciones de Maxwell.

Las pruebas experimentales realizadas hasta la fecha están de acuerdo con las predicciones del modelo estándar, por lo que parece ser un buen candidato a esta teoría unificadora. Este modelo se asienta en dos pilares básicos como son la *mecánica cuántica* y la *relatividad especial* y se formaliza matemáticamente gracias a la *teoría cuántica de campos* (QFT), una compleja teoría que aplica los conceptos de la física cuántica a los campos continuos de la física, como por ejemplo el electromagnético, así como a las interacciones entre estos y la materia, es decir, a las fuerzas. Fruto de esa interpretación cuántica del campo surge el concepto de *partículas mediado-*

ras de fuerzas, o “cuantos” de un campo, y que se denominan *bosones de gauge*. En efecto, el modelo estándar explica que las fuerzas son en realidad intercambios de partículas, lo que sin duda representa una revolución conceptual de la idea de interacción entre partículas y campos. De este modo tenemos partículas de materia, aquellas que constituyen cualquier tipo de materia, y partículas mediadoras de las fuerzas, y ambas se diferencian en una propiedad intrínseca denominada espín que vale $1/2$ para las primeras (formalmente denominadas en física *fermiones*) y 1 para las segundas (*bosones*). El modelo estándar explica un total de doce tipos de partículas de materia divididos en dos grupos principales, los *quarks* (*up*, *down*, *strange*, *charm*, *top* y *bottom*) y los *leptones* (*electrón*, *muón*, *tau* y sus *neutrinos* correspondientes). A esto hay que añadir las antipartículas asociadas. En lo que respecta a las partículas mediadoras de fuerza –o bosones de gauge– tenemos los conocidos *fotones*, mediadores de la fuerza electromagnética entre las partículas eléctricamente cargadas, los bosones W^+ , W^- y Z , que median las interacciones débiles entre quarks y leptones, y finalmente los *gluones*, responsables de las interacciones nucleares fuertes entre quarks.

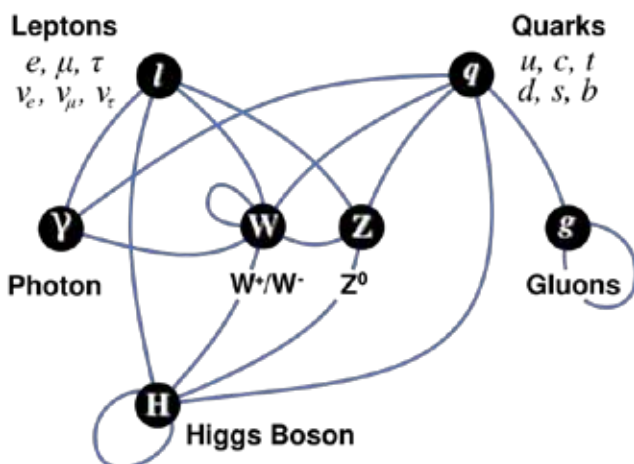


Figura 6. Esquema de las interacciones entre partículas según el Modelo Estándar.

Lo excitante de esta historia, y ahí es donde entra en juego el LHC, es que todas las partículas fundamentales predichas por el modelo estándar han sido observadas experimentalmente, todas menos una, la que parece ser la clave del enigma, el *bosón de Higgs*, cariñosamente denominado por esta circunstancia como “la partícula de Dios”. Se trata de una hipotética partícula elemental con masa pero que a diferencia del resto de

partículas elementales no tiene ningún espín intrínseco. Según el modelo, el bosón de Higgs es la pieza que falta para entender el origen de la masa de algunas partículas elementales, y más concretamente, cómo partículas elementales sin masa pueden provocar que la materia tenga masa. En particular, el bosón de Higgs explicaría la diferencia entre el electromagnetismo (mediado por el fotón, sin masa) y la fuerza débil (mediada por los bosones W y Z con masa), aspectos fundamentales de la estructura de la materia tanto en el nivel microscópico como en el macroscópico. Además, parece que este bosón podría explicar por qué la gravedad es tan débil comparada con las otras tres fuerzas.

Hasta la fecha, ningún experimento ha detectado directamente la existencia del bosón de Higgs, aunque hay evidencias indirectas de él. La dificultad para observarlo radica fundamentalmente en el hecho de que se requiere una excepcional cantidad de energía para crearlo. Ahora, gracias al LHC, los científicos esperan encontrarlo rebuscando entre los fragmentos resultantes de la colisión entre protones con energías de 7 TeV –dando un total de energía de 14 TeV, lo que reproduciría algunos eventos ocurridos en las etapas más tempranas del big bang. Junto al bosón de Higgs también podrían observarse otras nuevas partículas también predichas teóricamente por la física de altas energías, como los *strangelets*, los micro-agujeros negros, el monopolio magnético o las partículas supersimétricas.

La clave para conseguir estos objetivos reside en la energía de las partículas que chocan. Como en cualquier otro acelerador de partículas, la máxima energía que se puede obtener es directamente proporcional al tamaño del acelerador y a la fuerza que acelera las partículas. Esta fuerza es causada por un campo magnético que en el LHC será creado por los imanes bipolares (dipolos) superconductores más potentes construidos

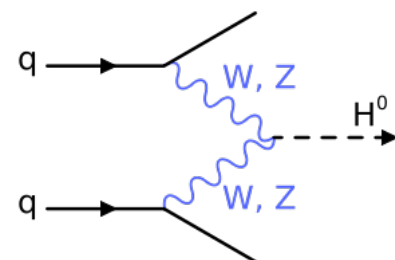


Figura 7. Diagrama de Feynman que explica el mecanismo que produciría el bosón de Higgs en el LHC: dos quarks emiten cada uno un bosón W o Z que se combinan para dar un bosón de Higgs.

hasta la fecha. Un total de unos 10.000 imanes, de los que 1.600 son superconductores, generarán el campo magnético necesario $-8,3$ Teslas- para conseguir energías del orden del Tera-electronvoltio. El LHC no es un círculo perfecto, está compuesto por ocho sectores, cada uno con un arco y una sección recta. Los arcos contienen los imanes bipolares que dirigen la trayectoria de las partículas mientras que en las secciones rectas se han instalado otros dispositivos como detectores de partículas y correctores del haz. Cada dipolo, de 15 m de largo y unas 35 toneladas de peso, utiliza cables de Niobio-Titanio que se comportan como superconductores a una temperatura inferior a -264 °C. Por esta razón, la temperatura de funcionamiento del LHC es de 1,9 K (aproximadamente -271 °C, unos dos grados por encima del cero absoluto de temperatura). Además, si los imanes funcionaran a temperaturas más elevadas, la corriente de 11.700 amperios $-necesaria$ para producir el campo magnético deseado- fundiría los cables. Para mantener a esta temperatura las 4.700 toneladas de material que hay en cada uno de los ocho sectores, el LHC utilizará el sistema criogénico más grande del mundo. El refrigerante es helio líquido y el proceso de refrigeración ocurre en varias fases: el helio se enfría primero en unos refrigeradores y luego mediante turbinas; a continuación se inyecta en los imanes y unas unidades de refrigeración bajan la temperatura hasta la deseada. En total hacen falta unas 120 toneladas de helio y el proceso de enfriamiento dura varias semanas. Además del proceso de enfriamiento hay otro proceso crítico en el funcionamiento del LHC, se trata de su sincronización con el *super sincrotrón de protones* (SPS), que es la última unión en la cadena de aceleradores inyectores del LHC (ver Figura 8). La sincronización entre los dos aceleradores debe tener una precisión de una mil-millonésima de segundo.

Después de casi veinte años de preparación, el 10 de septiembre circuló con éxito el primer haz de protones a lo largo de los 27 km de circunferencia a una energía de 0,450 TeV. Desafortunadamente para muchos, y afortunadamente para los catastrofistas, las operaciones del LHC fueron interrumpidas el 19 de septiembre debido a una fuga de helio líquido provocada por un fallo en la conexión eléctrica entre dos de los imanes superconductores. Debemos esperar hasta la primavera del 2009 para verlo de nuevo operativo. Mientras tanto, seguro que volveremos oír hablar del fin del mundo.

Pedro Córdoba Torres

Dpto. de Física Matemática y de Fluidos

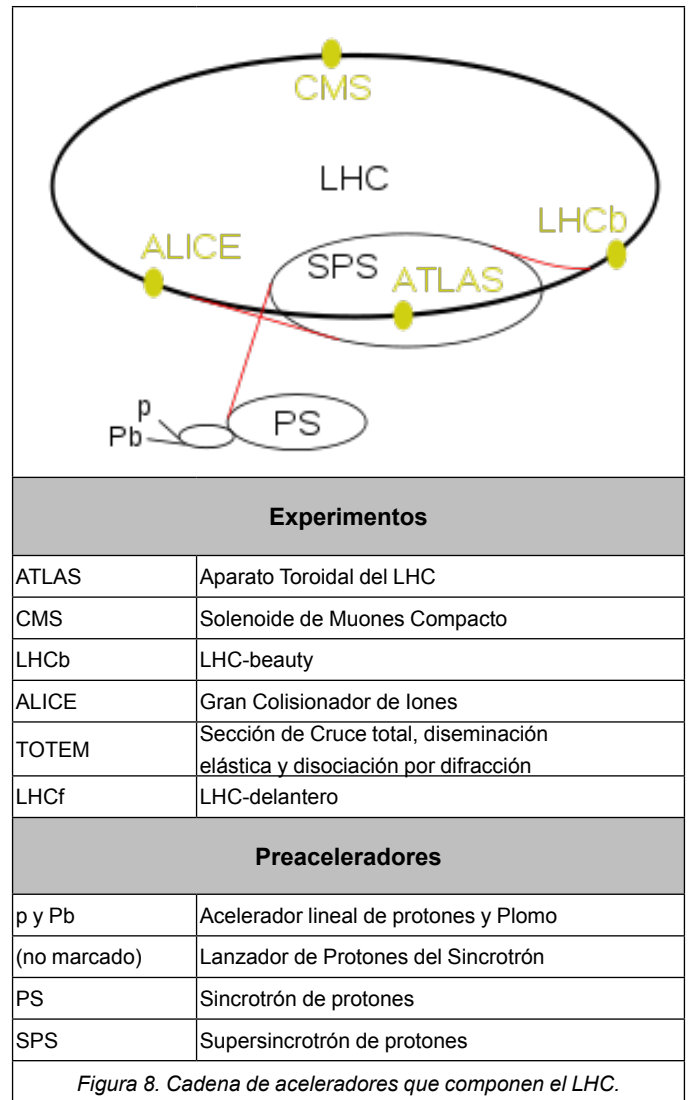


Figura 8. Cadena de aceleradores que componen el LHC.

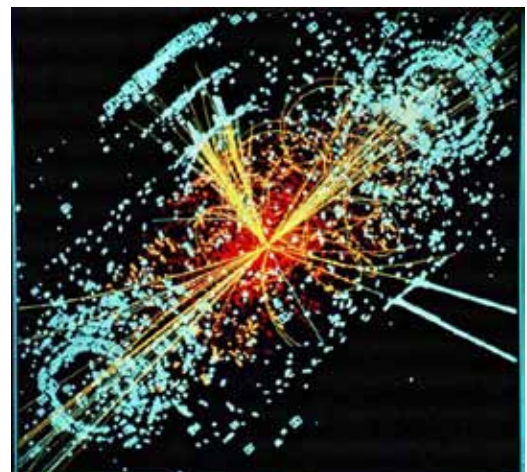


Figura 9. Simulación de la aparición del bosón de Higgs en el detector CMS del LHC.