

NOVEDADES CIENTÍFICAS EN 2012

EN FÍSICA

FÍSICA DE PARTÍCULAS

- Sin duda, la noticia científica del año 2012 fue el descubrimiento del *bosón de Higgs*. El 4 de julio los portavoces de ATLAS y de CMS, los dos principales experimentos que se llevaban a cabo en el LHC, anunciaron que habían encontrado una partícula compatible con el mecanismo de Higgs por el que las partículas elementales adquieren masa. Ya en diciembre de 2011 se habían anunciado indicios pero el nivel de fiabilidad estadístico estaba por debajo de los 3 sigmas, cuando el estándar exigido en estos casos es de 5 sigmas. (También se habían detectado indicios en los últimos experimentos realizados en el Tevatrón de Fermilab, en Chicago, antes de su clausura definitiva en septiembre de 2011). Tras este primer anuncio se hicieron experimentos con una energía algo superior que permitieron medir muchos más sucesos y alcanzar la fiabilidad requerida. Lo que detectaron tanto ATLAS como CMS fue un aumento importante de pares de fotones de alta energía. Aunque no es ésta la vía de desintegración más probable de un bosón de Higgs, sí es la más fácilmente distinguible frente al fondo de sucesos de orígenes diversos.

En ese momento no estaba todavía claro que dicha partícula fuera el “*bosón de Higgs*” (la expresión más simple del campo de Higgs) o fuera una entre un conjunto de partículas relacionadas con el mecanismo de Higgs. Para dilucidar esta cuestión se necesitan más experimentos, aunque por el momento todo apunta a que sea una partícula única, lo que también es importante porque sería la única partícula escalar conocida.

- El descubrimiento del bosón de Higgs hizo que pasaran desapercibidas otras noticias importantes. Por ejemplo, meses antes el propio experi-

mento ATLAS había encontrado la partícula χ_b ($3P$) compuesta por un quark bottom y su correspondiente antiquark; a su vez, el experimento CMS había encontrado el barión neutro χ_b compuesto por un quark up, un quark down y un quark extraño. Ambas partículas son predichas por el *Modelo Estándar*.

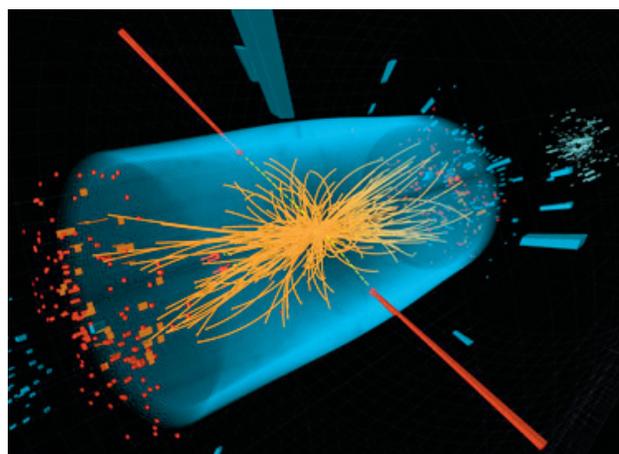


Figura 1. Evento en el LHC.

- El *Modelo Estándar* contempla la simetría CPT. En 1957 se comprobó experimentalmente la ruptura de la simetría CP, lo que indirectamente significaba que también debía romperse la simetría T, es decir, la invariancia de las leyes respecto a la inversión del tiempo. Esta ruptura se comprobó en la desintegración de mesones B pero experimentos recientes en el acelerador BaBar de Stanford han medido un valor de esta asimetría bastante mayor del esperado, lo que quizá requiera ligeras modificaciones en el modelo.

FÍSICA NUCLEAR

- En 2002 se descubrió que el Fe-45 se desintegraba mediante emisión de dos protones. Ahora se ha sugerido que núcleos con gran exceso de neutrones sobre protones pueden desintegrarse con emisión de un dineutrón (dos neutrones ligados). Una desintegración de este tipo se ha visto en un núcleo de Be-16.

- Un tema interesante de la física nuclear es la distribución de protones y neutrones en un núcleo. Para núcleos muy pesados las capas más exteriores están constituidas por neutrones. Normalmente el radio nuclear se mide mediante dispersión de protones o neutrones por núcleos, pero estas partículas interactúan mediante interacción fuerte y no distinguen entre protones y neutrones. Por el contrario, la dispersión de electrones sí permite distinguir entre protones y neutrones y medir así el radio protónico. También hay que tener en cuenta los efectos de interacción débil, que dependen del espín. De este modo se ha medido que el radio del Pb-208 es de 5,78 fermis ($5,78 \times 10^{-15}$ m) con una “piel de neutrones” de 0,33 fermis.
- La detección de neutrinos solares es una poderosa herramienta para entender los mecanismos estelares de generación de energía. La reacción de fusión más habitual en el Sol es la reacción protón-protón. Sin embargo, la detección de un neutrino de una energía de 1,44 MeV en el experimento Borexino que le lleva a cabo en el laboratorio subterráneo del Gran Sasso indica que también se producen reacciones protón-electrón-protón en una proporción de 1 a 400 frente a las reacciones pp.

ASTROFÍSICA

- El bosón de Higgs era la última pieza del Modelo Estándar. Explica la masa de las partículas elementales del Modelo Estándar (lo que no quiere decir que toda la masa de las partículas de la materia ordinaria sea debida al bosón de Higgs). En cualquier caso, la materia ordinaria solo representa el 8% de la masa del universo. Hay otro 23% que no es explicable por el Modelo Estándar. Se trata de la *materia oscura*, materia solo sensible a la interacción gravitatoria. La detección de la materia oscura es así uno de los objetivos fundamentales de la cosmología. Una forma de detectarla sería detectar la radiación generada por la hipotética desintegración partícula-antipartícula de materia oscura. Se ha buscado dicha radiación en sistemas concretos como algunas estrellas o las galaxias enanas del Grupo Local, pero con resultado negativo. Otra forma de detectar la materia oscura sería a partir de las distorsiones ópticas en la luz proce-

dente de ciertos sistemas. Hasta ahora el mejor candidato era el Cúmulo Bala. Ahora, observaciones astronómicas desde el Observatorio de Munich sugieren la presencia de un filamento de materia oscura entre las regiones 222 y 223 del cúmulo de Abell.

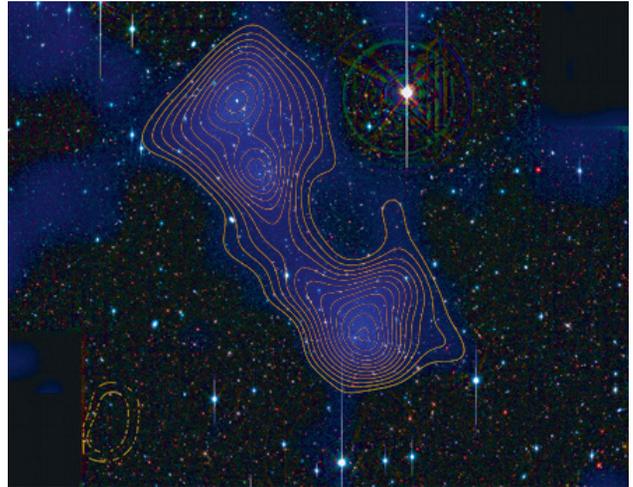


Figura 2. Materia oscura en el cúmulo de Abell.

- La materia oscura parece necesaria para explicar tanto la temprana formación como los movimientos actuales de las galaxias. Los cúmulos galácticos se separan siguiendo la expansión del universo, pero dentro de los cúmulos las galaxias tienen movimientos peculiares. Ahora se han medido estos movimientos directamente mediante el efecto Sunyaev-Zeldovich cinemático. Este efecto, predicho en 1972, consiste en una distorsión del espectro de la radiación cósmica de fondo debida a dispersión Compton inversa de los fotones de la radiación por los electrones del gas caliente que forma parte de las galaxias.
- Se han detectado varias galaxias de menos de 600 millones de años. Estos estudios son importantes para entender la evolución inicial del universo y la era de la reionización.
- También se ha detectado la protoestrella más “joven” observada hasta el momento. La llamada Roberta J. L1527 tiene aproximadamente 300.000 años. La estrella se está formando a partir del material de una región de gas hidrógeno concentrada, con una masa total de unas cinco masas solares, que cae en espiral hacia el centro de la región formando un disco de acreción de un diámetro

comparable al del sistema solar. Los procesos en este disco de acreción emiten radiación infrarroja que ioniza el gas. La masa acumulada actualmente es de aproximadamente un 20% de la masa solar, totalmente insuficiente para desencadenar reacciones de fusión.

FÍSICA DE MATERIALES

- El *grafeno* sigue siendo el material de moda. Apenas pasa un mes sin que se descubran nuevas aplicaciones. Las extraordinarias propiedades electrónicas del grafeno se deben a que sus bandas de valencia y de conducción son tangentes en algunos puntos del espacio de momentos. Cerca de dichos puntos las relaciones de dispersión son lineales, los llamados conos de Dirac: la energía es proporcional al momento, como sucede con las partículas sin masa. Esto le confiere una extraordinaria conductividad eléctrica. Sin embargo, la ausencia de gap entre las bandas es también un inconveniente para su uso en transistores. Para solucionarlo se ha propuesto intercalar láminas de grafenos con capas de nitruro de boro.

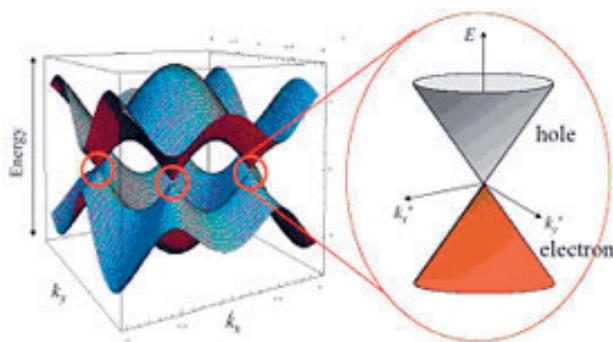


Figura 3. Bandas del grafeno.

- Asimismo, la alta conductividad térmica del grafeno permite aprovecharlo para disipar el calor generado en los circuitos electrónicos.
- También se han propuesto importantes aplicaciones ópticas. Ya hace años se ha utilizado el grafeno para fotodetectores sensibles. Ahora, hibridando el grafeno con puntos cuánticos se han conseguido multiplicar la sensibilidad por factores de hasta 10^9 .
- Estimulando el grafeno con pulsos de 35 femtosegundos se observa una inversión de población:

más electrones en la banda superior del cono de Dirac que en la inferior. Con esta inversión de población basta el estímulo de un electrón para que los estados excitados se desexciten emitiendo radiación láser infrarroja.

- Una estructura periódica de nanodiscos de grafeno constituye un absorbente casi perfecto, en particular de infrarrojos. Cuando se dopan los nanodiscos con electrones extra pueden formarse plasmones que absorben fuertemente la luz y la confinan en regiones mucho menores que su longitud de onda.
- Hasta ahora se pensaba que los conos de Dirac solo podían aparecer en una estructura hexagonal perfecta como la del grafeno natural. No obstante, simulaciones numéricas han mostrado que también pueden aparecer en hasta 20 pautas distintas en dos dimensiones. Incluso se podrían conseguir conductividades diferentes según la dirección. Estos materiales propuestos se denominan *grafinos*.
- Ya se ha construido un tipo de grafeno artificial. Con una punta de microscopio de efecto túnel se colocan moléculas de CO sobre un sustrato de cobre formando una pauta hexagonal. El CO repele los electrones que se mueven en la superficie del cobre, que adquieren una relaciones de dispersión similares a las del grafeno.
- Pero las aplicaciones del grafeno no se limitan al aprovechamiento de sus propiedades electrónicas o térmicas. También simulaciones numéricas muestran que membranas de grafeno serían mucho mejores que las poliméricas para desalación.
- Imitando la pauta geométrica del grafeno en otros materiales se ha observado la aparición de conos de Dirac en las relaciones de dispersión de ondas acústicas. Así, se han conseguido velocidades de propagación del sonido extraordinariamente altas taladrando orificios de 3mm de diámetro formando una pauta hexagonal en una lámina de plexiglas.
- La electrónica actual está basada en el silicio. Por ello se está trabajando en un nuevo material llamado siliceno que, a semejanza del grafeno, consistiría en una lámina de silicio de espesor monoatómico. Esto puede hacerse condensando vapor de silicio en una superficie de plata. El siliceno tendría propiedades semejantes a las del grafeno, con la ventaja de ser el mismo material del que están formados los circuitos electrónicos actuales.

MEDIDAS DE ALTA PRECISIÓN

- En 2005 se concedió el Premio Nobel de Física a JOHN HALL y THEODOR HÄNSCH por el desarrollo de la técnica del peine de frecuencias ópticas. Ahora se ha ampliado esta técnica al rango ultravioleta, de modo que se pueden generar frecuencias correspondientes a transiciones atómicas (ver 100cias@uned, 9, p.112). Esto abre nuevas perspectivas al estudio de la física atómica y molecular. También permitirá una estimación más exacta de algunas constantes fundamentales como la constante de estructura fina.
- En 1999 se concedió el Premio Nobel de Química a AHMED ZEWAIL por utilizar pulsos ultracortos para el estudio de reacciones químicas (ver 100cias@uned, 3, p.80). Con sus trabajos había nacido la femtoquímica. Desde entonces se han conseguido pulsos cada vez más cortos. En 2012 se han batido todos los records al conseguir pulsos de 67 attosegundos (67×10^{-18} segundos) lo que permitirá un estudio más preciso de los movimientos electrónicos.
- Un interferómetro de Michelson permite determinar la diferencia entre las longitudes de los brazos si se conoce la longitud de onda exacta de la luz utilizada. Sin embargo, utilizando un peine de frecuencias para alimentar el interferómetro, la determinación de las distancias puede hacerse de forma más precisa sin necesidad de conocer la longitud de onda, pues el peine equivale a la utilización de todo un conjunto de láseres.

Las medidas más precisas del tiempo se hacen mediante relojes atómicos. Estos relojes miden transiciones electrónicas entre niveles energéticos y permiten una precisión de 10^{-17} segundos. Ahora se ha sugerido que esta precisión podría multiplicarse por 100 si en lugar de estudiar oscilaciones electrónicas se estudian oscilaciones de un neutrón en un núcleo de torio excitado con un láser ultravioleta. Un reloj semejante atrasaría 1/10 segundos cada 14.000 millones de años, es decir, el tiempo de vida del universo.

- No obstante, la manipulación de tales relojes tiene sus problemas. Por ello, también se ha sugerido que podría alcanzarse una precisión similar con relojes atómicos pero utilizando átomos muy

ionizados de modo que los electrones restantes estuvieran muy ligados al núcleo.

Alternativamente, un equipo internacional de astrofísicos ha propuesto un método para mantener una escala estable de tiempos. La escala estaría basada en la observación de un conjunto de 19 púlsares de periodos inferiores a la millonésima de segundo.

FÍSICA CUÁNTICA

- La computación cuántica se basa en que los qubits que contienen la información pueden estar en estados superpuestos. Por ello, para construir un computador cuántico sería necesario mantener la coherencia el mayor tiempo posible. Almacenando qubits en átomos de fósforo sobre un soporte de silicio 28 ultrapuro, se ha logrado mantener la coherencia durante más de 3 minutos.
- Otro aspecto fundamental en la computación cuántica es la corrección de errores. Un método de corrección es la llamada corrección topológica. Con este objetivo se han construido estados entrelazados por polarización de cuatro pares de fotones.
- También para la transmisión de información cuántica es necesario proteger el entrelazamiento de los sistemas frente a la decoherencia. Para ello se ha propuesto un método basado en medidas débiles no proyectivas.
- El entrelazamiento entre sistemas permite transferir el estado cuántico de un sistema a otro sin que la información que se transfiere sea transportada en el espacio por una onda o un portador material. Los sistemas pueden estar muy separados. En 2012 se produjo una curiosa carrera por conseguir el record de distancia a la que se teleportaba un estado cuántico. JIAN WEI PAN, un físico chino, había aprendido la técnica de teleportación en Europa con ANTON ZEILINGER. Establecido en China, Pan consiguió en 2010 teleportación entre sistemas separados 16 km. Pero en mayo de 2012 sorprendió al mundo científico con el anuncio de una teleportación a 93 km. Los más sorprendidos fueron el propio Zeilinger y su equipo en Viena, que se apresuraron a publicar, una semana más tarde, los resultados reelaborados de un experimento realizado años antes en

las Islas Canarias y que mostraban teleportación a 143 km. Parece que ambos equipos quieren colaborar ahora para conseguir triplicar esta distancia y establecer teleportación entre la superficie terrestre y un satélite.

- Aunque un computador cuántico de propósito general es todavía un sueño, una posibilidad más cercana es un simulador cuántico. Un prototipo se está desarrollando en el NIST. Consiste en una capa de iones de berilio en un plano circular de 1 mm de diámetro dentro de una trampa de Penney. Los qubits se manejan mediante pulsos de láser de duraciones bien controladas. Con un centenar de qubits podrían simularse problemas relativos a sistemas cuánticos complejos.

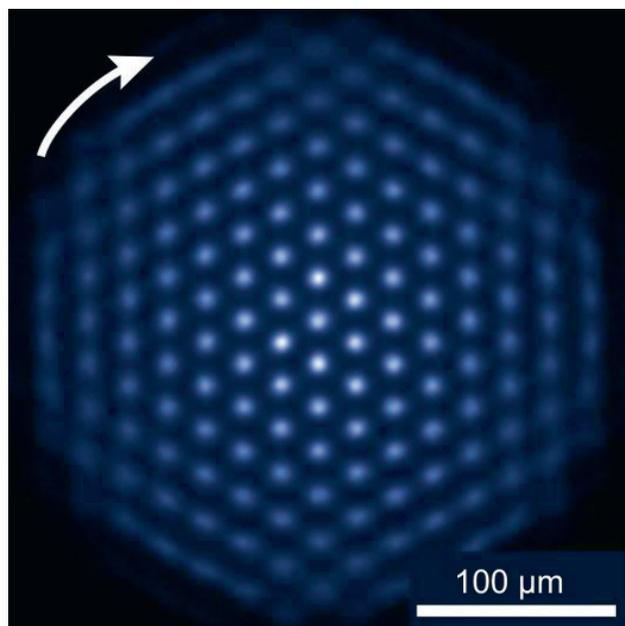


Figura 4. Simulador cuántico.

- Hace 50 años ROLF LANDAUER estableció que la computación no consume energía si se utilizan puertas lógicas y circuitos reversibles. Lo que consume energía es el borrado de los bits para poner un circuito a cero. Esto reduce la entropía del bit a cambio de generar calor. Cada bit borrado requiere una energía $kT \ln 2$, lo que pone un límite (aún lejano) a la miniaturización de los circuitos con puertas lógicas de un computador clásico. Ahora se ha medido experimentalmente por primera vez esta energía.
- El principio de incertidumbre mecano-cuántico implica la existencia de fluctuaciones incluso en

el cero absoluto de temperaturas. Estas fluctuaciones se manifiestan en el comportamiento de sistemas atómicos pero ahora se han detectado por primera vez en un sistema microscópico, en concreto en una pequeña barra de silicio de 12 micras de longitud y una micra de diámetro iluminada por un láser. A temperaturas suficientemente altas las fluctuaciones térmicas ordinarias hacen que la barra pueda absorber o ceder energía por igual a los fotones que inciden sobre ella. Sin embargo, cuando la barra se enfría por debajo de 0,5 K ya no puede ceder energía que no tiene: solo se detecta absorción de energía, que es la firma de una fluctuación cuántica.

- En 1962 JOSEPHSON descubre el efecto que lleva su nombre por el que una corriente eléctrica en un superconductor atraviesa un aislante por efecto túnel. Ahora se ha detectado un efecto que es la contrapartida del efecto Josephson para un flujo magnético. Si se coloca un anillo de material superconductor a una temperatura superior a la crítica en el seno de un campo magnético, el campo magnético penetra en el material. Sin embargo, por debajo de la temperatura crítica el anillo se hace superconductor y expulsa el campo magnético (efecto Meisner). El superconductor puede considerarse en cierto modo como un aislante para el campo magnético. Además, el flujo magnético a través de la región limitada por el anillo está cuantizado. Sin embargo, si el grosor del anillo se estrecha hasta el grosor de un nanoalambre se observa una interacción entre el campo magnético en las regiones interior y exterior al anillo; es decir, un flujo magnético ha atravesado el superconductor.
- Hace más de 70 años ETTORE MAJORANA propuso la existencia de partículas que fueran su propia antipartícula. Desde entonces no se ha encontrado ninguna partícula elemental semejante aunque se ha sugerido que podrían existir “cuasipartículas”, excitaciones colectivas de electrones, que se comportaran de esa manera. Estas partículas se han encontrado en la interfaz entre un superconductor topológico y un semiconductor. Estas partículas abrirían un nuevo campo para la construcción de computadores cuánticos por su robustez.

J. Javier García Sanz
Dpto. de Física Fundamental