

## NOVEDADES CIENTÍFICAS

### Novedades científicas en Física en el año 2001

#### COSMOLOGÍA Y ASTROFÍSICA

• La posible variación con el tiempo de las constantes fundamentales ha sido tema de especulación desde que Dirac propuso en los años 30 una relación entre la intensidad de las interacciones y la edad del Universo. Hasta ahora no se ha encontrado ninguna prueba convincente de su variación, y diferentes evidencias, tanto astronómicas como geológicas, permiten imponer cotas muy estrictas a la misma. Una constante fundamental es la constante de estructura fina  $\alpha = e^2 / \hbar c$  que mide la intensidad de la interacción electromagnética. Su nombre proviene en concreto del hecho de que  $\alpha$  determina la estructura fina de los espectros atómicos, es decir, el desdoblamiento de los niveles electrónicos debido a la interacción espín-órbita. Por lo tanto, una variación de  $\alpha$  con el tiempo se traduciría en una variación de la separación entre las líneas que constituyen la estructura fina de los espectros de absorción en diferentes momentos de la historia del Universo. Ahora, un grupo internacional de astrónomos afirma que de la comparación de los espectros de absorción por nubes de gas de la luz procedente de cuásares a diferentes distancias se infiere un aumento de una parte en  $10^5$  de la constante de estructura fina.

• También a partir de los espectros de absorción de cuásares lejanos, otro equipo de astrónomos ha encontrado evidencia de un fenómeno conocido como reionización del Universo. Según la teoría del Big Bang, el Universo nació hace unos 14.000 millones de años en un estado de densidad y temperatura enormes. La posterior expansión

hizo que la temperatura descendiese hasta que a los 400.000 años de su nacimiento estaba lo suficientemente frío para que protones y electrones se uniesen para formar átomos de hidrógeno neutros. En este momento la luz dejó de interactuar con la materia, salvo para frecuencias bien definidas que son absorbidas y se manifiestan en los espectros de absorción. Con el tiempo se formaron las primeras estrellas que empezaron a emitir radiación ultravioleta. Esta radiación ionizó de nuevo los átomos del medio interestelar. Como consecuencia, los espectros de absorción debidos a las nubes de gas interestelar ionizado deberían presentar líneas diferentes de los debidos a nubes de gas neutro. Comparando espectros de cuásares a diferentes distancias, y por lo tanto, de diferentes edades, se ha podido determinar que la reionización empezó cuando el Universo tenía aproximadamente 900 millones de años.

#### FÍSICA DE PARTÍCULAS

• La simetría *CPT* (conjugación de carga, paridad e inversión temporal) es un resultado fundamental de la teoría cuántica de campos. Por ello, la violación de la simetría *T* observada en la desintegración de los kaones era prueba indirecta de la violación de *CP*. Sin embargo, transcurridos ya casi cuarenta años a partir de aquél descubrimiento, no existía ninguna prueba directa concluyente de tal violación, aunque en 1998 ya se obtuvieron algunos indicios en un sistema de mesones *B* neutros. (Ver 100cias@uned n.º 2, 1999, pág. 57). Estos indicios han sido ahora plenamente confirmados por dos colaboraciones distintas (BaBar,

en SLAC de Stanford, y Belle en KEK de Japón).

• En 1999, un grupo de investigadores del Lawrence Berkeley National Laboratory anunció la detección del elemento 118. Dicho elemento habría sido producido artificialmente lanzando átomos de  $^{86}\text{Kr}$  contra blancos de  $^{208}\text{Pb}$ , técnica conocida como fusión caliente. (Ver 100cias@uned n.º 3, 2000, pág. 69). Sin embargo, intentos posteriores de encontrar este elemento en experimentos similares realizados en otros laboratorios (Darmstadt, Caen, Japón) fracasaron. Tras un nuevo análisis de los resultados obtenidos en Berkeley, el grupo se ha retractado de su precipitado anuncio. La búsqueda del elemento 118 sigue abierta.

• El mayor detector de neutrinos existente es el de Kamiokanda en Japón (ver 100cias@uned n.º 2, 1999, pág. 57). Este detector consiste en un estanque subterráneo de 50.000 toneladas de agua pura, rodeados por 11.000 tubos multiplicadores para detectar la radiación Cerenkov producida por los electrones dispersados en una colisión elástica con un neutrino. Lamentablemente, el detector ha quedado temporalmente inutilizable pues una explosión en cadena destruyó la mayoría de sus tubos fotomultiplicadores.

• Durante muchos años, uno de los mayores enigmas de la astrofísica era la escasez de neutrinos solares detectados. Según el modelo solar estándar, las reacciones de fusión en el interior del Sol deben producir un intenso flujo de neutrinos electrónicos, aunque de las medidas realizadas en los detectores terrestres sólo se puede inferir un flujo de neutrinos solares que es aproximadamente 1/3 del predicho. La explicación propuesta era que los otros 2/3 se habían convertido en neutrinos muónicos y tauónicos

nicos, que no son detectables por detectores, como el de Kamiokanda, que utilizan agua ordinaria. Esta explicación parece confirmada por los resultados preliminares obtenidos en el nuevo Observatorio de Neutrinos en Sudbury (Canadá) que utiliza agua pesada. En este caso, los neutrinos pueden interactuar cuasielásticamente con el deuterón y romperlo, y la sección eficaz para este proceso es mucho mayor que la sección eficaz para la colisión elástica neutrino-electrón. No obstante, se necesitan más observaciones para determinar las proporciones exactas de los tres "sabores" de neutrinos y poder validar el modelo de oscilaciones entre ellos.

## FÍSICA CUÁNTICA

- El fenómeno de la doble ionización simultánea en átomos, cuando éstos se someten a un campo láser intenso, parece más frecuente de lo que se esperaba. Ya se había observado en varios gases nobles de alto número atómico, pero ahora se ha observado en el helio, con sólo dos electrones y una alta energía de ionización. El modelo teórico propuesto afirma que un electrón es liberado por el intenso campo del láser y acelerado por el propio campo para golpear y arrancar también al otro electrón.

- En 1995 Peter Shor ideó un algoritmo cuántico para factorizar números en tiempo polinómico (ver 100cias@uned n.º 0, 1997, pág. 47). Este algoritmo se ha implementado en 2001 para factorizar 15 en sus factores 3 y 5. Esto no parece muy espectacular, pero su importancia es extraordinaria. Por una parte, es el primer caso en el que un problema que clásicamente pertenece a la clase NP (de tiempo no polinómico) se transforma en un problema de clase P (y contradice así una formulación débil de la conjetura de Church-Turing). Por otra parte, el número de qubits uti-

lizados, 7, era bastante menor de los aproximadamente 20 estimados previamente. Los 7 qubits eran los espines nucleares de 5 núcleos de flúor y 2 de carbono en una molécula sintetizada a tal efecto, que presentan frecuencias de resonancia magnética bien definidas y diferenciadas. Parece difícil, sin embargo, que por esta vía pueda conseguirse un número de qubits mucho mayor, por lo que la utilización del algoritmo para factorizar números grandes deberá esperar a que se disponga de otro tipo de puertas lógicas.

- La mayor parte de los experimentos llevados a cabo hasta ahora para validar la mecánica cuántica frente a las teorías con realismo local utilizaban pares de fotones enmarañados. Las teorías con realismo local conducen a las desigualdades de Bell que deberían ser satisfechas por las correlaciones entre las medidas de los espines de ambos miembros del par; tales desigualdades se violan en los experimentos, en buen acuerdo con las predicciones de la mecánica cuántica. Sin embargo, la bajísima eficiencia de los detectores de fotones polarizados planteaba la duda de si los fotones detectados eran una muestra realmente representativa del conjunto total de fotones emitidos y, por consiguiente, si existía un sesgo en las correlaciones efectivamente medidas. Esta posible vía de escape se ha cerrado ahora con un experimento en el que los pares de fotones han sido sustituidos por pares de iones de berilio en una trampa de Paul lineal. Los iones pueden encontrarse en uno de dos niveles excitados, y la eficiencia de la detección es ahora del 95%. Por consiguiente, los átomos realmente detectados son una muestra realmente fiable del colectivo total de pares enmarañados y las correlaciones estadísticas son absolutamente fiables.

- La difracción de partículas por estructuras periódicas es un

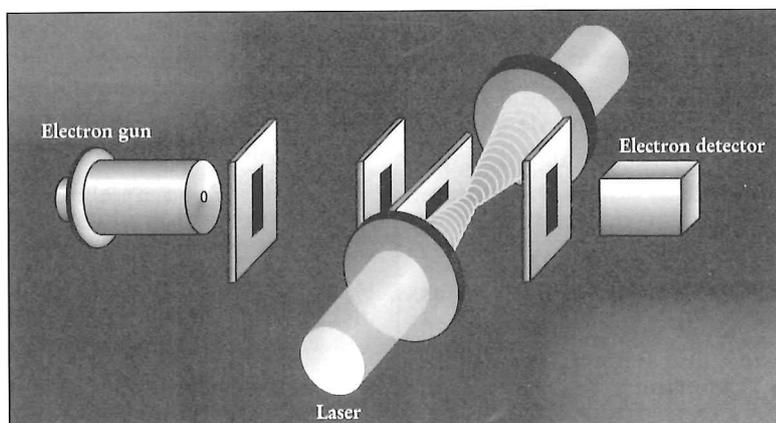
fenómeno cuántico por excelencia. Los experimentos de Thomson y de Davidson y Germer de difracción de electrones por estructuras cristalinas fueron fundacionales en el nacimiento de la mecánica cuántica. En 1933 Kapitza y Dirac predijeron que los electrones también podrían ser difractados por ondas estacionarias: la separación de los picos de difracción sería proporcional a la longitud de onda de Broglie de los electrones e inversamente proporcional a la longitud de onda de la onda estacionaria. Sin embargo, la interacción de los electrones libres con la luz es muy débil y nunca se había podido crear una onda estacionaria suficientemente intensa para producir el efecto. Ahora se ha creado una onda de algunos milímetros lanzando uno contra otro dos potentes haces láser y se ha podido observar el efecto Kapitza-Dirac. Con esto se podría hacer un interferómetro óptico 10.000 veces más sensible que cualquier otro dispositivo óptico.

- La cuantización de los niveles electrónicos en el campo eléctrico debido a un protón está en el origen de la teoría cuántica. Análogamente, los niveles energéticos de una partícula en un campo gravitatorio también deberían estar cuantizados. Una manifestación de ello sería, por ejemplo, que una pelota que rebota elásticamente en una superficie horizontal no podría alcanzar cualquier altura, sino sólo un conjunto discreto de alturas cuantizadas. Naturalmente, el efecto es muy difícil de observar debido a la extrema debilidad de la interacción gravitatoria comparada con la electromagnética, pero ahora se ha observado: la pelota es un neutrón sometido a la acción de la gravedad que rebota sobre un espejo.

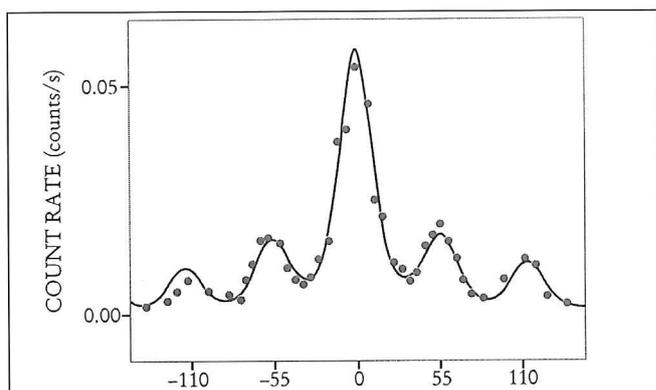
- La característica fundamental del caos determinista en dinámica clásica es la sensibilidad a las condiciones iniciales. Para ello es



Davisson (a la izda.) y Germer (a la derecha) en los Bell Laboratories donde hicieron el primer experimento de difracción de electrones.



Diseño experimental para la observación del efecto Kapitza-Dirac.



Patrón de difracción de electrones obtenido con el experimento de la figura anterior. Se constata el buen acuerdo entre los cálculos numéricos y los resultados experimentales.

necesario que las leyes que gobiernan la dinámica sean no lineales. La mecánica cuántica es una teoría lineal, de modo que no podemos hablar de caos en el sentido anterior. Sin embargo, es importante estudiar el comportamiento cuántico de sistemas que en una descripción clásica exhibirían caos. En este sentido se ha descubierto que el túnel

dinámico en sistemas cuánticos se ve favorecido cuando el comportamiento clásico subyacente es caótico.

### MATERIA CONDENSADA

- Tan sólo seis años después de su primer anuncio, la creación de condensados de Bose-Einstein

(BEC) es ya algo rutinario y continuamente aparecen nuevos tipos de condensados y nuevas técnicas para obtenerlos y manejarlos. Ahora se ha añadido el helio al catálogo de elementos aptos para un BEC. También se ha creado un condensado de Bose-Einstein de átomos de rubidio en una trampa magnética construida litográficamente en un microchip. El condensado pudo desplazarse 1,6 mm a lo largo del microchip sin perder la coherencia.

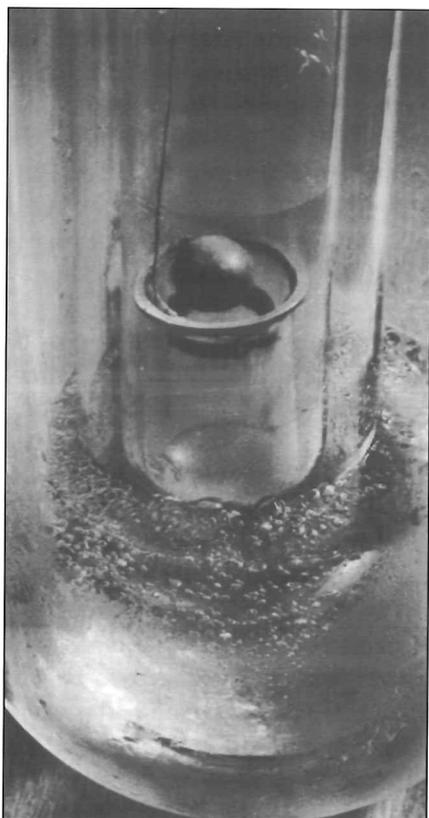
- Hasta ahora la forma habitual de obtener condensados de Bose-Einstein consistía en enfriar los átomos en trampas magnéticas. Ahora se ha conseguido un método mucho más rápido y sencillo que utiliza simplemente trampas ópticas. Estas trampas consisten básicamente en un haz láser intenso muy focalizado, y se basan en la existencia de fuerzas dipolares eléctricas que tienden a confinar a los átomos en las regiones donde la intensidad del haz es mayor. Así se han conseguido condensados de átomos de <sup>87</sup>Rb en tan sólo dos segundos, diez veces más rápido que con trampas magnéticas. Además, se abre la posibilidad de formar condensados de átomos no magnéticos, de moléculas o de átomos en varios estados de espín.

### FÍSICA DE MATERIALES

- El año 2001 se abrió con el anuncio de que el MgB<sub>2</sub> era superconductor con una temperatura crítica  $T_c = 39$  K, casi el doble de la mayor temperatura crítica hasta ahora encontrada en los superconductores tradicionales, basados en la teoría de Bardeen, Cooper y Schrieffer (BCS), y un campo magnético crítico de 16 T. Lo más curioso es que los compuestos de boro habían sido extensamente estudiados hace 20 años (antes de la aparición de los superconductores a base de cupratos y tierras raras), pero este compuesto concreto, fácilmente disponible, había sido pasado por alto. El mag-

nesio cede sus dos electrones de valencia a los enlaces covalentes del boro, lo que hace que aumente la densidad de portadores en las bandas que contribuyen al mecanismo BCS. Por otra parte, la pequeña masa de los átomos de boro hace que la frecuencia de los fonones, que son responsables del mecanismo BCS, sea alta, y con ello aumenta también la temperatura crítica.

- Es sabido que ferromagnetismo y superconductividad son propiedades difícilmente compatibles, pues exigen tipos de apareamientos electrónicos en los que los espines juegan papeles diferentes. (No obstante, en el año 2000 se descubrió que el  $UGe_2$  era ferromagnético y superconductor simultáneamente (ver 100cias@ uned n.º 4, 2001, pág. 54) y en el 2001 se ha descubierto lo mismo para el  $ZrZn_2$ ). Por consiguiente, parecía difícil que el hierro, material ferromagnético por excelencia, pudiera ser superconductor. Sin embargo, a bajas temperaturas y altas presiones el hierro pierde sus propiedades mag-



Superconductividad: esfera levitando a 4,2 K por efecto Meissner.

néticas. Esto se debe a que pasa de una estructura cúbica centrada en el cuerpo (b.c.c.) a una hexagonal compacta. A una presión de 15 GPa y una temperatura de 1 K el hierro reduce drásticamente su resistividad eléctrica y expulsa los campos magnéticos, características típicas de la superconductividad.

- La superconductividad en fullerenos dopados con átomos alcalinos es conocida desde hace años, aunque la temperatura crítica más alta conseguida hasta ahora era de 52 K. Había evidencia, sin embargo, de que la temperatura crítica aumentaba con el tamaño de los dopantes colocados entre las moléculas de fullereno. La razón parece estar en que al estirar la red del fullereno las bandas de energía se estrechan y la densidad de estados electrónicos aumenta. Siguiendo esta idea, científicos de los Bell Labs han intercalado moléculas de tribromometano ( $CHBr_3$ ) entre las moléculas de fullereno y han alcanzado una temperatura crítica de 117 K. Se piensa que con dopantes más grandes podría llegarse a los 150 K, próxima a la temperatura crítica de los cupratos, aunque parece difícil estirar mucho más la red del fullereno sin provocar fracturas. Con estas estructuras no se podrán formar cables, pero sí podrían formarse películas delgadas con grandes aplicaciones.

- Precisamente investigando la superconductividad de los fullerenos, otro grupo de físicos dio fortuitamente con el descubrimiento quizá más espectacular del año: que los fullerenos  $C_{60}$  muestran propiedades magnéticas a temperaturas tan altas como 500 K. Los fullerenos en cuestión son fullerenos poliméricos que son capas bidimensionales de "buckybolas" en fase romboédrica. El hecho, de confirmarse, es verdaderamente sorprendente pues los átomos de carbono individuales no tienen momento magnético pues no hay electrones desapareados. La estructura rombo-

édrica podría provocar el desapareamiento en algunos átomos, pero quedaría por explicar por qué los electrones desapareados no forman enlaces covalentes.

- Como es sabido, los fullerenos son moléculas de carbono con una configuración esférica que recuerda a la de ciertas cúpulas geodésicas o a la de los parches de un balón de fútbol. El silicio es un elemento del mismo grupo que el carbono, y también presenta una gran variedad de combinaciones, pero no presenta este tipo de configuraciones huecas. Sin embargo, sí se han encontrado este tipo de configuraciones con átomos de metales de transición atrapados en su interior. El número de átomos de silicio que "encierran" al átomo metálico depende de cuál sea éste. Una posibilidad prevista para estos clusters es la de utilizar los átomos encerrados como qubits en un computador cuántico. Los clusters de silicio aislarían al qubit del entorno y aumentarían el tiempo de decoherencia, que es una condición necesaria para poder realizar cálculos largos.

## ÓPTICA

- Ninguna partícula puede viajar a mayor velocidad que la luz en el vacío. Sin embargo, en un medio material de índice de refracción  $n$  la luz viaja a una velocidad  $c/n$ , y una partícula puede viajar a una velocidad mayor que ésta. Si la partícula está cargada emite un cono de radiación Cerenkov visible. Éste es uno de los métodos más habituales para detectar partículas. Sin embargo, ahora se ha visto que también puede emitirse radiación Cerenkov infrarroja (en un cristal de seleniuro de cinc) a velocidades superlumínicas mediante la formación de dipolos relativistas en procesos ópticos no lineales.

- Hasta ahora, los pulsos de luz láser más cortos conseguidos eran del orden de femtosegundo ( $10^{-15}$  s) e implicaban sólo unos pocos ciclos

de la luz utilizada. Así se ha conseguido seguir la evolución de reacciones químicas a bajas temperaturas. Sin embargo, para seguir el movimiento de electrones en átomos y moléculas se necesitarían pulsos mucho más cortos. Un método de obtenerlos es mediante la generación de armónicos altos, en la que un alto número de fotones se combinan en un gas noble para dar un único fotón de longitud de onda mucho menor. Así se ha obtenido un pulso de rayos X de 1,8 fs a partir de pulsos infrarrojos de 7 fs. Se confía en que con esta técnica pudiera llegarse al rango de los attosegundo ( $10^{-18}$  s).

- En 1999 se consiguió reducir la velocidad de la luz que atraviesa un medio material hasta el valor de 17 m/s. (ver 100cias@uned n.º 3, 2000, pág. 71). En el 2001 se ha conseguido “parar” la luz. En realidad, no se trata de frenar los fotones. Lo que ocurre es que la información que transmiten los fotones que componen un pulso (la forma del pulso y la polarización) se almacena como un patrón coherente de espines atómicos en un gas. Algunas decenas o incluso centenas de microsegundos más tarde, esta información puede transferirse de nuevo al campo de radiación y reconstruir el pulso original. Se espera que de la misma forma puedan almacenarse estados no clásicos tales como luz estrujada o fotones individuales. Esto tendría aplicaciones en el intercambio de información entre sistemas atómicos y fotónicos en procesos de comunicación y computación cuántica.

## NANOTECNOLOGÍA

- El manejo de átomos individuales es una realidad desde hace años. Ahora se han construido diversos dispositivos que permiten almacenar átomos y transportarlos fácilmente aprovechando la interacción entre sus momentos magnéticos y un campo magnético externo

de la forma apropiada. De este modo se han construido divisores de haces atómicos, cintas transportadoras (grabadas litográficamente sobre un sustrato) o interruptores.

También se han construido anillos de almacenamiento para átomos. Cuando se habla de anillos de almacenamiento pensamos en los anillos asociados a los grandes colisionadores en donde partículas elementales eléctricamente cargadas se mueven a velocidades próximas a la de la luz y con energías de GeV; en este caso, lo que mantiene a las partículas en una trayectoria circular es la fuerza de Lorentz debida a un campo magnético. En los anillos de almacenamiento de átomos neutros, éstos son guiados por la interacción del momento magnético con un campo magnético generado por dos conductores concéntricos. Así se pueden mantener nubes de átomos en trayectorias circulares de unos 2 cm de radio. La velocidad de los átomos es tan sólo de unos 83 m/s y su energía es del orden de los neV ( $10^{-9}$  eV), por lo que a este aparato se le ha dado el nombre de Nevatrón.

- Aunque la nanotecnología ha llegado ya al nivel atómico y a la construcción de rotores moleculares, la construcción de micromáquinas sigue teniendo gran interés. Un grupo de físicos húngaros han construido lo que podría denominarse un “molino de luz”. La rueda del molino se esculpe en un material resinoso mediante un láser. La rueda puede mantenerse mediante “pinzas ópticas” y se mueve por la presión de luz de un haz láser. De la misma forma pueden construirse hélices o engranajes del tamaño de las micras.

- Se ha creado el primer chip neuronal colocando células nerviosas de caracol (*lymnata stagmalis*) sobre un chip de silicio. Para evitar que las células se muevan a medida que crecen sus conexiones es necesario encerrarlas en una “valla” de poliamida. Una señal

eléctrica pasa del silicio a una célula y puede transmitirse por las conexiones sinápticas a células vecinas antes de pasar de nuevo al silicio.

- ¿Puede conservarse el comportamiento superconductor a medida que reducimos el tamaño de un sistema? El mecanismo básico de la superconductividad es la formación de pares de Cooper, que son bosones y por lo tanto se propagan con más facilidad. Sin embargo, la propagación de estos pares es sensible a efectos de tamaño. Así se ha visto que los conductores muy finos pierden de propiedad superconductora antes que los gruesos. Los efectos se hacen notar a partir de un grosor de 30 nm.

J. Javier García Sanz  
Dpto. de Física Fundamental

## Novedades científicas en Química en el año 2001

### QUÍMICA Y COMPUTACIÓN

Que las técnicas de cálculo con computador son ya indispensables en la investigación química es una realidad. La mayor parte de su éxito estriba en que la simulación numérica de las propiedades de la materia, en todas sus escalas puede bien reemplazar con éxito a la experimentación en situaciones muy difíciles o costosas, bien servir de guía para descartar antieconómicos ensayos reales. Todo el conocimiento teórico sobre la estructura de la materia sirve así de base para buscar aplicaciones de tipo industrial en gran variedad de campos y, en muchos casos, esto no requiere casi ningún entrenamiento específico por parte del usuario de un buen número de estos programas de cálculo, que pueden ser utilizados como verdaderas “cajas negras”, si bien no debería abusarse de ello