

$$N(d) = \frac{1}{2} \sum_{d_1+d_2=d} \frac{d_1 d_2 (3d d_1 d_2 - 2d^2 + 6d_1 d_2 (3d - 4))!}{(3d_1 - 1)! (3d_2 - 1)!} N(d_1) N(d_2)$$

De aquí se obtiene, después de unas operaciones sencillas, que $N(3)=12$, $N(4)=640$, $N(5)=87.304$, $N(6)=26.312.976$, ...

Para presentar una historia parcial de las técnicas que han hecho posible este resultado, creo que hemos de comenzar con la topología, más concretamente con la teoría de nudos. La teoría de nudos se ocupa de los encajes de la circunferencia en el espacio y está íntimamente relacionada con el estudio de las variedades de dimensión tres. Uno de los métodos clásicos usados para distinguir dos nudos es mediante invariantes como el polinomio de Alexander, cuya interpretación geométrica aparece al estudiar la homología de la cubierta cíclica infinita del nudo considerado.

Hace unos quince años, V. F. R. Jones (medalla Fields del año 90) introdujo un nuevo invariante polinómico para nudos, mediante el uso de las álgebras de von Neuman [J]. Rápidamente se produjeron gran cantidad de generalizaciones e interpretaciones combinatorias, pero era deseable una interpretación geométrica para conocer la naturaleza de tales invariantes. Tal interpretación tuvo su origen en ideas provenientes de la física y fue dada por E. Witten (también medalla Fields en 1990),

[W1] en términos de una teoría topológica-cuántica de campos (topological quantum field theory, TQFT, ver [A]). El término cuántica viene del uso de las álgebras de Hopf $U_p(\mathfrak{g})$ o grupos cuánticos.

A partir de las ideas de Witten se han producido muchos otros desarrollos y se han obtenido nuevos invariantes de variedades de dimensión 3.

Dentro de la TQFT también se pueden encuadrar los invariantes de Witten-Gromov y la cohomología cuántica (en el artículo [KM] se introduce la axiomática de la cohomología cuántica). En realidad el origen del estudio de este tipo de invariantes viene de algo más atrás: la teoría gauge de Donaldson (medalla Fields en 1986) y la teoría de Gromov de curvas pseudoholomorfas. Los problemas de recuento en geometría algebraica aparecen en la propia definición de los invariantes de Witten-Gromov, en particular el recuento de curvas pseudo-holomorfas en una variedad $2n$ dimensional simpléctica con una estructura cuasi-compleja adaptada (ver, por ejemplo, [RT]).

El último paso, no por ello menos sorprendente, es la relación de los invariantes de Witten-Gromov con un sistema de ecuaciones diferen-

ciales de tercer orden: las ecuaciones de Witten-Dijkgraaf-Verlinde-Verlinde, ecuaciones WDVV (ver las notas de S. Nantazon, [N], sobre la estructura de Dubrovin-Frobenius que aparece en el conjunto de soluciones de este tipo de ecuaciones). Las ecuaciones WDVV dan lugar a fórmulas de recurrencia para los invariantes de Witten-Gromov y a las fórmulas de geometría enumerativa con las que hemos comenzado esta nota.

REFERENCIAS

- [A] M. Atiyah, *The Geometry and Physics of Knots*, Lezioni Lincee, Cambridge University Press, Cambridge 1990.
- [KM] M. Kontsevich, Y. Manin, *Gromov-Witten classes, quantum cohomology and enumerative geometry*, *Comm. Math. Phys.* **164** (1994), 525-562.
- [J] V. F. R. Jones, *A polynomial invariant for knots via von Neumann algebras*, *Bull. Amer. Math. Soc.*, **12** (1985), 103-111.
- [N] S. Nantazon, *Structures de Dubrovin*, Publication de l'institut de recherche mathématique avancée, Strasbourg 1997.
- [RT] Y. Ruan, G. Tian, *A mathematical theory of quantum cohomology*, *J. Differential Geom.* **42** (1995), 259-367.
- [W1] E. Witten, *Quantum field theory and the Jones polynomial*, *Comm. Math. Phys.*, **121** (1989) 351-399.

Antonio F. Costa
Depto. de Matemáticas Fundamentales

NOVEDADES CIENTÍFICAS

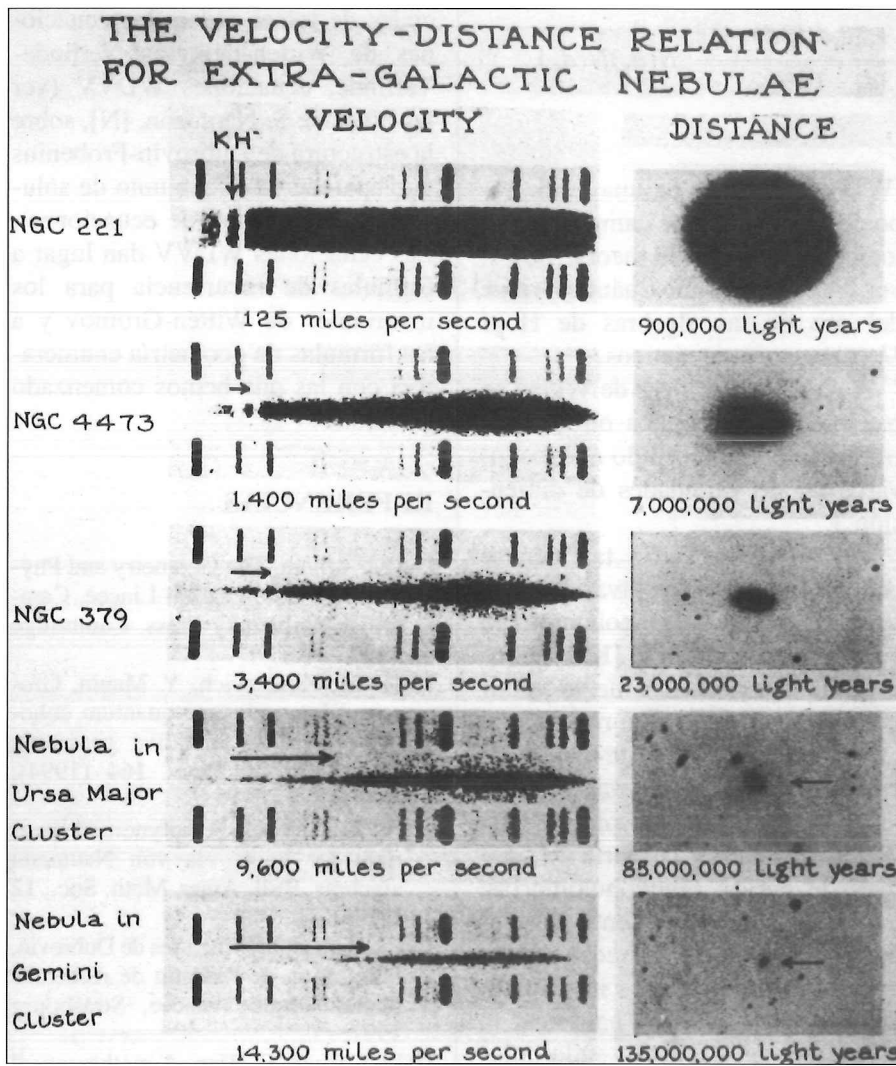
Novedades científicas en Física

ASTROFÍSICA Y COSMOLOGÍA

• Desde que Hubble descubrió que el universo se expande, la determinación exacta del valor de la constante de Hubble H_0 ha sido

uno de los máximos objetivos de la cosmología observacional. El propio Hubble estimó un valor de 550 km/s/Mps (kilómetros por segundo por megaparsec), que es a todas luces exagerado pues daría una edad para el universo menor que las estimaciones geológicas de la edad de rocas de la Tierra. Desde entonces, las estimaciones se han ido afinando, aunque tradicionalmente se

han mantenido dos escuelas contrarias. En 1999, un equipo dirigido por Wendy Freedman, heredero de la escuela de Gerard de Vaucouleurs, ha llegado a una estimación de $H_0 = 71 \pm 7$ km/s/Mps, mientras que la escuela contraria, dirigida por Allan Sandage, acepta ahora un valor de $H_0 = 60 \pm 6$, lo que reduce considerablemente las diferencias anteriores.



Hubble utilizó estos cinco espectros, en los que se observa que el desplazamiento hacia el rojo aumenta con la distancia, para establecer su famosa ley de expansión del Universo.

Estas diferencias se deben fundamentalmente a las incertidumbres en la escala de distancias cósmicas. Para distancias pequeñas las medidas pueden hacerse directamente por paralaje, pero para distancias cada vez mayores hay que recurrir a métodos indirectos, como es la relación entre brillo y período para las Cefeidas, que encierran varios factores de error. El pasado año, sin embargo, se ha podido medir directamente la distancia a la galaxia NGC4258, que es de $23,5 \pm 1$ millones de años-luz. La medida se ha hecho siguiendo el movimiento de nubes de gas con emisión máser mediante VLBI (Interferometría de Larga Línea de Base). Este valor difiere en un 15% del valor obtenido mediante la escala usual basada en las Cefeidas.

Es de esperar, por lo tanto, que estas medidas directas sirvan para una mejor calibración de la escala de distancias. En cualquier caso, esto no agota la cuestión de la edad del Universo. En efecto, cada vez son mayores las evidencias de que la expansión se está acelerando en lugar de frenarse. Si es así, la edad del Universo ya no sería simplemente el recíproco de la constante de Hubble sino que podría ser mayor. Asimismo, esto obligaría a reintroducir la constante cosmológica de Einstein en los modelos del Universo.

• En 1999 se ha puesto en marcha el detector LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) de ondas gravitacionales. El observatorio consiste en dos túneles de 2 km en forma de L, en cuyos

extremos hay espejos en donde se reflejan sendos haces láser que actúan como brazos de un interferómetro. El paso de ondas gravitacionales podría alterar la longitud entre los espejos y producir efectos de interferencia.

También se ha sugerido que los anillos de almacenamiento del CERN podrían utilizarse como detectores de posibles ondas gravitacionales que podrían producir ligeras desviaciones en las trayectorias de las partículas.

FÍSICA DE PARTÍCULAS

• Hace un año, el detector Superkamiokanda, en Japón, midió las oscilaciones de neutrinos producidos en la atmósfera por colisiones de rayos cósmicos. Estas medidas fijaron una cota inferior de unos 0,05 eV para la masa del neutrino. (Ver 100cias@uned n.º 2, 1999, págs. 56-57). En su segunda fase, el detector se ha preparado para medir las oscilaciones de neutrinos procedentes de una fuente terrestre y que ya han atravesado un primer detector. La comparación de los resultados en ambos detectores permitiría una medida mucho más precisa de las oscilaciones entre los tres tipos de neutrinos.

La existencia del neutrino fue propuesta inicialmente como un modo de satisfacer la ley de conservación del momento angular en la desintegración β . Por ello, el método más natural para medir la posible masa de los neutrinos era a partir del espectro de energías de los electrones emitidos. No obstante, estas medidas tenían muchas fuentes de error. Ahora, un experimento basado en la desintegración β de moléculas diatómicas de tritio ha estimado una masa para el neutrino electrónico de $2,5 \text{ eV}/c^2$. Pero el experimento presenta una sorpresa: en el espectro energético de los electrones aparece un pico anómalo en una posición que varía entre 5 y 15 eV por debajo de la energía máxima y con un período de 6 meses. Este período sugiere una relación con el período orbital

de la Tierra. Por ello se ha propuesto la fantástica explicación de que la doble desintegración β estudiada implica la captura de neutrinos en estados ligados, reliquias del universo primitivo, y concentrados en nubes irregularmente repartidas a lo largo de la órbita terrestre.

- Hace aproximadamente 50 años, Handbury-Brown y Twiss pusieron de manifiesto la existencia de correlaciones entre fotones emitidos por fuentes incoherentes: los fotones tienden a agruparse en racimos de un tamaño muy superior a las fluctuaciones permitidas por la estadística poissoniana. Ésta era una manifestación sorprendente del carácter bosónico de los fotones, y es la base del denominado interferómetro de intensidad. Ahora, un experimento semejante con fermiones en procesos de transporte ha mostrado el efecto contrario: los fermiones tienden a "suavizar" las fluctuaciones.

FÍSICA NUCLEAR

- La supersimetría es una componente esencial de todas las teorías actuales sobre las partículas fundamentales. La supersimetría hace corresponder a cada partícula bosónica (partícula de espín entero) una compañera fermiónica (partícula de espín semientero). Aunque por el momento no hay forma de verificar directamente esta supersimetría a altas energías, una manifestación a bajas energías ha podido comprobarse en física nuclear. Los núcleos con un número par de protones y de neutrones (núcleos par-par) son bosones, mientras que los núcleos con un número par de protones y un número impar de neutrones (núcleos par-impar) son fermiones. La supersimetría en física nuclear ha permitido obtener con precisión los niveles energéticos de nucleos par-par a partir de los de núcleos par-impar vecinos.

- Durante los últimos años se han venido obteniendo en Darmstadt los elementos artificiales con números atómicos Z comprendidos

entre 106 y 112. La técnica utilizada para ello era la denominada de fusión fría, en la que elementos ligeros eran bombardeados con elementos pesados con una energía precisa para formar núcleos compuestos con poca energía de excitación. El inconveniente de dicha técnica era que por cada unidad de aumento en Z la sección eficaz de reacción disminuye en un factor de 3 a 5, y parecía difícil ir más allá del 112.

En 1999, se ha utilizado en Dubna (Rusia) y en el Lawrence Berkeley (USA) una técnica alternativa de fusión caliente, en la que núcleos muy pesados de Pb^{207} o Pu^{244} son bombardeados con núcleos mucho más ligeros (Kr^{86} o Ca^{48}). A principios de 1999 se obtuvo en Dubna el elemento 114 con una vida media de varios segundos, lo que parecía confirmar la existencia predicha de islas de estabilidad en torno a $Z=114$ y $A=298$. Meses más tarde, en Berkeley se obtuvo el elemento X_{118}^{293} que inmediatamente se transforma en Y_{116}^{289} por desintegración α . Sin embargo, la vida media de estos nuevos elementos es de sólo algunas diezmilésimas de segundo.

FÍSICA ATÓMICA

- El dibujo de los típicos orbitales $3d$ en forma de pesas formaba parte de todos los libros sobre enlace químico. Ahora, los mismos libros podrán incluir una "fotografía" de los orbitales. Mediante una técnica combinada de difracción de rayos X y de electrones, que permite medir la distribución de carga en 3D, se han observado directamente por primera vez tales orbitales en óxidos de cobre. Asimismo se han observado enlaces covalentes entre átomos de Cu.

- Se ha puesto a punto una técnica que permite construir a medida estados cuánticos de Rydberg en átomos. Un estado de Rydberg es un estado altamente excitado de un átomo hidrogenoide, cuyo radio medio puede alcanzar centenares de ångströms. Para construir tales esta-

dos, un láser excita en primer lugar un estado coherente en el átomo. Dicho estado es medido y comparado con el estado que se desea construir. La diferencia alimenta otros láseres que actúan sobre el átomo hasta que se consigue la función deseada en tan sólo unas pocas iteraciones.

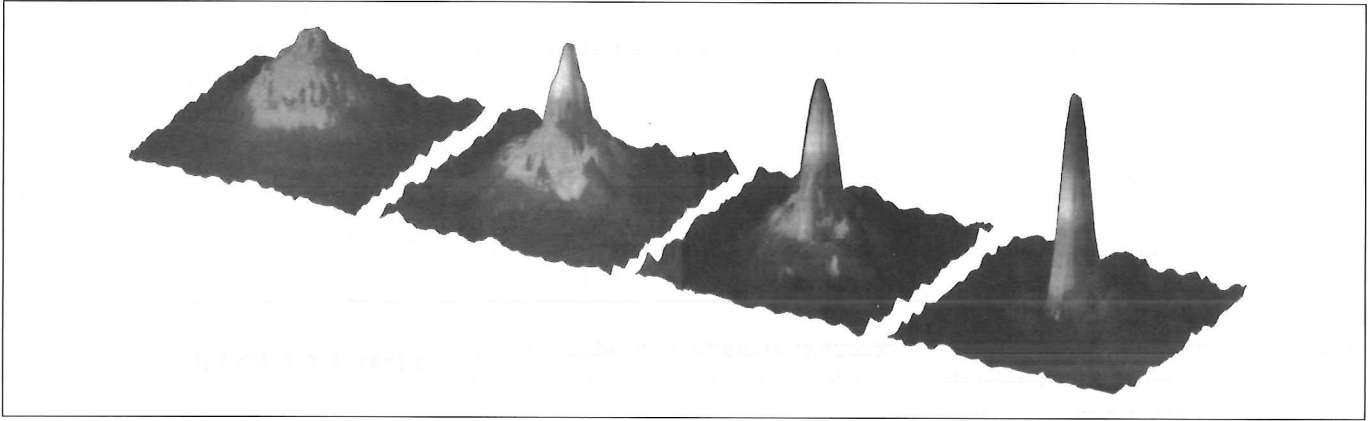
FÍSICA CUÁNTICA

- La interferencia y la difracción de partículas son fenómenos genuinamente cuánticos. Hasta ahora se había obtenido difracción de partículas subatómicas, átomos y moléculas ligeras en redes de difracción. En 1999 se ha observado difracción con fullerenos C_{60} y C_{70} , lo que supone un aumento de un orden de magnitud en la masa. La red de difracción era un cristal de nitruro de silicio con rendijas de 50 nm de anchura y una separación de 100 nm. La velocidad de las moléculas de fullereno era de 220 m/s, que corresponde a una longitud de onda de de Broglie de 0,025 nm. Experimentos de este tipo son importantes para situar la frontera clásico-cuántica.

- La difracción de rayos X ha sido siempre una herramienta fundamental para determinar y reconstruir la estructura de objetos periódicos o cuasi-periódicos. Sin embargo, ahora se ha utilizado cristalografía de rayos X, combinada con tratamientos informáticos, para reconstruir la estructura de objetos no periódicos.

- Se ha conseguido una fuente de fotones individuales con energías y momentos de emisión bien determinados (dentro de los límites impuestos por el principio de incertidumbre). En un pozo limitado por barreras tipo-p y tipo-n en un cristal de AsGa se inyectan electrones y huecos de forma controlada. Alterando el voltaje se provoca la recombinación y la correspondiente emisión de un fotón.

- Hace aproximadamente quince años Berry demostró que cuando un



Formación de un condensado de Bose-Einstein cuando baja la temperatura en un gas en expansión libre.

sistema se somete a un cambio cíclico y adiabático de los parámetros externos, su función de onda quedaba alterada en una fase geométrica (fase de Berry). Una manifestación de esto se ha visto ahora en un punto cuántico sometido a un voltaje periódico, lo que da lugar a un flujo de corriente a través del punto.

- En un proceso de medida cuántica ordinaria, el estado cuántico del sistema, cuando no el propio sistema, queda destruido: por ejemplo, la medida del estado de un fotón implica normalmente su absorción. Un tipo diferente de medidas son las denominadas medidas cuánticas no demoleedoras. En 1999 se han conseguido medidas no demoleedoras de fotones aislados. El fotón está almacenado durante 1 ms en una cavidad resonante superconductora de niobio que, a su vez, es atravesada por átomos de Rb en un estado de Rydberg con dos niveles resonantes con la frecuencia del fotón. El estado del átomo (la fase de la función de onda) mide la presencia de fotones en la cavidad sin destruirlos.

FÍSICA DE BAJAS TEMPERATURAS

- Desde que en 1995 se obtuvieron, por primera vez, condensados de Bose-Einstein, éstos no han dejado de estudiarse. Ahora se han creado vórtices de átomos en condensados de Rb⁸⁷ que podrían servir para estudiar la

dinámica de vórtices en muchas situaciones físicas. Para crear los vórtices, los átomos de Rb se desdoblaron en dos estados hiperfinos mediante un campo de microondas, y los átomos en un estado son puestos en movimiento alrededor de los átomos en el otro estado. Las propiedades del vórtice se determinan a partir de los efectos de interferencia entre ambos estados.

- Para crear excitaciones elementales en un gas de Bose degenerado se necesita una energía mínima: esto es lo que hace que un superfluido presente una viscosidad nula. Un efecto similar se ha puesto de manifiesto en un condensado de Bose-Einstein de sodio. Cuando se desliza un haz láser sobre el condensado, el haz no induce excitaciones hasta que su velocidad alcanza un cierto valor mínimo. Por encima de esta velocidad, el láser interactúa con el condensado y lo calienta.

- Los condensados de Bose-Einstein están constituidos por bosones que se agrupan en el mismo estado cuántico. Por el contrario, si las partículas son fermiones, el principio de exclusión de Pauli no permite que haya más de un fermión por estado. Desde que se consiguieron los condensados de Bose-Einstein se planteó la cuestión de si podrían obtenerse análogamente gases de Fermi-Dirac degenerados, en los que las partículas ocupasen los estados más bajos. Para ello es necesario enfriar los átomos a una temperatura pró-

xima a la energía de Fermi, pero aquí es donde el principio de exclusión se manifiesta como una dificultad. Un gas de Bose se enfría por evaporación: las partículas más energéticas escapan y quedan las partículas menos energéticas, que colisionan entre sí y reparten su energía hasta conseguir un nivel uniforme. Sin embargo, en un gas de Fermi los choques entre partículas están considerablemente reducidos por el principio de exclusión. Para conseguir que haya choques hay que separar los átomos en dos subniveles magnéticos (de espín nuclear) distintos. Así se han enfriado átomos de K⁴⁰ hasta 300 nK. Cuando se alcanza el estado degenerado, ya no son posibles los choques y la temperatura del condensado se estabiliza. Se espera que en estos condensados pueda estudiarse la formación de pares de Cooper y su condensación posterior en un estado superfluido.

MAGNETISMO

- Pese al auge de los dispositivos de grabación óptica, gran parte de la información se sigue almacenando en forma magnética. El soporte magnético está dividido en dominios sobre los que actúa secuencialmente una cabeza magnética que invierte la magnetización. El material magnético debe tener una coercitividad suficientemente grande para que la magnetización no se borre, pero

suficientemente pequeña para que se pueda invertir rápidamente mediante un campo externo. La coercitividad depende del tiempo durante el que se aplica el campo. La velocidad máxima alcanzada hasta ahora para el registro magnético es del orden de los nanosegundos. Por debajo de este tiempo aparecen dificultades prácticas y teóricas derivadas de las ecuaciones que rigen la dinámica de los espines. Recientemente se han estudiado dos métodos para alcanzar tiempos inferiores. El primero utiliza un campo magnético orientado perpendicularmente a la muestra a magnetizar. Con campos locales de varios teslas que actúan durante unos pocos picosegundos se consigue la precesión precisa de los espines para cambiar la magnetización del dominio.

El otro método consiste en una modificación del material donde se almacena la información. El soporte comprende una capa de óxido de níquel (antiferromagnético) sobre un sustrato de níquel-hierro (ferromagnético). Sobre la interfase actúa un láser que debilita las interacciones y libera los espines, que así pueden invertirse con más facilidad ante la acción de un campo externo. El tiempo necesario es de unos 100 ps.

SUPERCONDUCTIVIDAD

• Una de las paradojas de la superconductividad a bajas temperaturas es que metales que son excelentes conductores no son nunca superconductores, mientras que aleaciones de malos conductores sí muestran superconductividad. Por ejemplo, el Pt no es superconductor ni siquiera a $1,5 \mu\text{K}$ porque, supuestamente, las interacciones entre las impurezas magnéticas impiden la formación de pares de Cooper. Ahora, sin embargo, se ha observado resistencia nula y expulsión del campo magnético (la firma de la superconductividad) en polvo de platino comprimido con granos del tamaño de micras. La

temperatura crítica disminuye cuando aumenta la compresión del polvo, lo que sugiere la implicación de los fonones de superficie. Por el contrario, no se ha observado superconductividad en polvo de plata.

ÓPTICA

• Uno de los postulados esenciales de la física es que la velocidad de una onda luminosa en el vacío es independiente de su frecuencia. Hasta ahora, esto estaba confirmado experimentalmente con un margen de error de 5×10^{-17} . En 1999 se ha rebajado este margen de error hasta 6×10^{-21} .

• En un medio con índice de difracción n la luz se frena hasta una velocidad $v = c/n$. Ésta es, no obstante, la velocidad de fase para una onda monocromática de una frecuencia dada. Sin embargo, un pulso de luz está constituido por un conjunto de ondas monocromáticas; en este caso, la velocidad de grupo del pulso es $v_g = d\omega/dk$. Así, si el índice de refracción varía mucho con la frecuencia en un cierto intervalo de frecuencias, la velocidad de grupo puede ser muy pequeña a pesar de que n no difiera mucho de 1 en ningún caso. De esta forma, se han frenado pulsos de luz hasta la velocidad increíblemente lenta de 17 m/s en un condensado de Bose-Einstein de sodio a temperaturas entre 50 y 2000 nK. Para conseguir una fuerte variación del índice de refracción se recurre a la transparencia inducida electromagnéticamente (ver 100cias@uned, n.º 1, 1998, pág. 57) cerca de una línea de resonancia del sodio.

En el caso del condensado de sodio las bajas temperaturas eran necesarias para disminuir los ensanchamientos por efecto Doppler y aumentar la densidad. Sin embargo, la reducción del ensanchamiento Doppler puede conseguirse también mediante una configuración apropiada de los láseres que inducen la transparencia. Así, en el intervalo de

pocas semanas se obtuvieron efectos de frenado de luz semejantes incluso en medios a temperaturas de 360 K.

• Se abre el camino para tubos fluorescentes más eficientes y más limpios. Los fluorescentes actuales utilizan la emisión ultravioleta del vapor de mercurio excitado por una descarga eléctrica. Esta radiación ultravioleta es absorbida por el material fosforescente de las paredes del tubo que posteriormente se desexcita emitiendo luz visible. La diferencia de energías entre el fotón ultravioleta y el visible se pierde en transiciones no radiativas. Ahora se ha construido un tubo en el que el mercurio (que es tóxico) está sustituido por xenon, que emite a una frecuencia mayor. Por su parte, el material fosforescente es ahora fluoruro de gadolinio y litio dopado con europio. Con esto, cada fotón ultravioleta emitido por el xenon puede dar lugar a dos fotones visibles, con lo que la eficiencia aumenta drásticamente.

• Se han obtenido hologramas tridimensionales de estructuras cristalinas de óxido de cobalto con una precisión de 0,5Å. La técnica utiliza una combinación de fuentes convencionales de rayos X y radiación sincrotrón.

También se ha conseguido holografía instantánea y regrabable. Un pulso de tan sólo 5 ns de luz láser azul-verdosa basta para grabar un holograma en un placa de azobenceno. Calentando el holograma a 80°C durante un minuto la placa se borra y es reutilizable. Este podría ser un camino hacia las películas en 3D.

NANOTECNOLOGÍA

• Mediante un microscopio de fuerzas atómicas (AFM) se han medido directamente energías y longitudes de enlaces covalentes. La punta del AFM y el sustrato (ambos de óxido de silicio) se unen mediante un polímero (amilasa) que forma enlaces covalentes. Al separar la punta del sustrato se

observa una serie de discontinuidades en la desviación del fleje del AFM que corresponden a roturas sucesivas de enlaces. La mayor dificultad está en discriminar si los enlaces rotos corresponden a enlaces del polímero o enlaces punta-polímero o polímero-punta. Así, se han medido fuerzas de enlace de 1-2 nN. La longitud del enlace es de 1-2 Å.

- Una capa de moléculas de rotxano situada entre dos electrodos puede experimentar variaciones de resistividad de un factor 100. Esto puede utilizarse para construir puertas lógicas OR y AND de tamaño molecular.

NANOTUBOS

Los nanotubos constituyen un campo de investigación por sí mismos, tanto por sus aplicaciones prácticas como por las oportunidades que ofrecen para estudiar otros fenómenos fundamentales.

- Se ha observado, por ejemplo, que nanotubos de pequeña longitud muestran resistencia nula por debajo de 1K cuando están conectados a superconductores. Esto parece ser una manifestación del denominado "efecto de proximidad" por el que un metal ordinario puede transportar una supercorriente cuando forma un puente entre dos superconductores. No obstante, no se descarta que los propios nanotubos puedan ser superconductores.

- Por otra parte, mediante microscopía de efecto túnel (STM) se pueden observar los electrones en nanotubos de 20 nm y medir la resistividad en varios puntos. La resistividad varía periódicamente en el espacio, lo que es una fuerte evidencia de la existencia de ondas estacionarias.

- El pequeño radio de los nanotubos hace que puedan ser utilizados también como cribas moleculares para separar isótopos. De este modo se ha logrado separar tritio de hidrógeno normal.

- Los nanotubos también pueden utilizarse para estudiar los

gases de electrones en 1D, el llamado líquido de Luttinger, que sería cualitativamente diferente de los gases 2D y 3D.

- Otro genuino efecto cuántico observado en nanotubos es el efecto Aharonov-Bohm. Según éste, la fase de un electrón queda alterada si la trayectoria del mismo encierra un flujo de campo magnético, aunque el propio electrón no esté sometido al campo. En un nanotubo, los electrones pueden moverse en ambos sentidos alrededor del eje del nanotubo. Si el nanotubo encierra un flujo magnético, la fase de los electrones es alterada y se producen efectos de interferencia entre electrones que viajan en sentidos opuestos.

FLUIDOS

- La advección caótica sigue dando sorpresas. Cuando se remueven juntos dos fluidos viscosos, las porciones de fluido se estiran y se pliegan, favoreciendo la mezcla entre ellos. Sin embargo, ahora se ha observado que al remover con un agitador electromagnético periódico una capa de fluido viscoso de 1 mm de espesor, aparece una figura recurrente que puede mantenerse durante 100 ciclos, hasta que se desvanece gradualmente. El fenómeno desaparece cuando se reduce la viscosidad.

- Los motores de combustión más eficientes utilizan el ciclo de Stirling. Éste es un ciclo en el que un pistón comprime y expande un fluido que está sometido a un gradiente de temperatura. Ahora se ha construido un motor en el que el pistón está sustituido por una onda acústica viajera. En una onda semejante la presión y la velocidad están en fase y ello hace que la onda se amplifique en cada ciclo, convirtiendo así la energía térmica en energía mecánica sonora con una eficacia próxima al 30%, tan sólo un 10% por debajo de la eficiencia máxima de Carnot.

METROLOGÍA

- Desde 1983 el metro se define como la distancia que recorre la luz en $1/299792458$ segundos y el segundo se define a partir de la frecuencia correspondiente a una transición hiperfina en el átomo de Cs. La exactitud de los patrones de longitud y tiempo depende así de la precisión con que pueda medirse esta transición. Hasta ahora los átomos de Cs utilizados como relojes atómicos procedían de un horno, y el movimiento térmico introducía una pequeña anchura en la frecuencia medida. Ahora se ha construido una fuente que permite lanzar átomos de Cs con velocidad controlada, lo que aumentará considerablemente la precisión.

- Desde un punto de vista práctico, no obstante, sería mucho más cómodo obtener realizaciones prácticas de los patrones de longitud y tiempo a partir de longitudes de onda y frecuencia de láseres. El problema es que la anchura de emisión de los láseres está determinada por las vibraciones de las cavidades Fabry-Perot utilizadas para seleccionar los modos de emisión. Ahora, mediante la técnica de "mode locking", que permite fijar las fases entre los diferentes modos, se ha construido un láser que emite en el visible a 563 nm con una anchura de línea de 0,6 Hz, diez veces más estrecha que cualquiera obtenido hasta la fecha. Si se avanza en esta dirección, es posible que las próximas definiciones de segundo se basen en la frecuencia de láseres de este tipo, que permitirían una precisión 10.000 veces mayor que la de los relojes de Cs actuales.

- El efecto túnel se ha utilizado para obtener un nuevo patrón de capacitancias. Mediante efecto túnel se pueden introducir electrones, uno a uno, en un condensador y medir la diferencia de potencial ΔV frente a la carga total Ne . Se ha llegado así a una precisión de 2 ppm y se espera llegar hasta 0,01 ppm.

J. Javier García Sanz
Depto. de Física Fundamental