

NOVEDADES CIENTÍFICAS

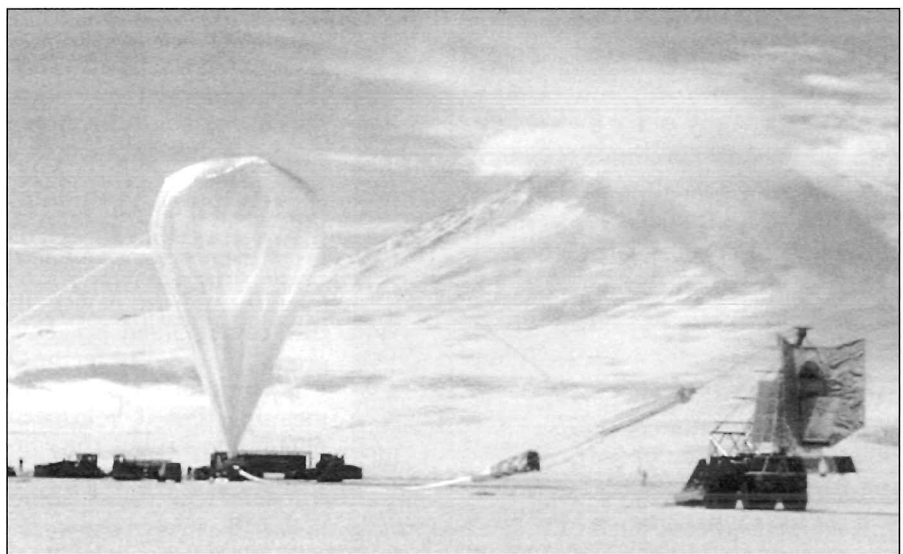
Novedades en Física en el año 2000

COSMOLOGÍA Y ASTROFÍSICA

En 1992 el satélite COBE consiguió detectar mínimas fluctuaciones (del orden de 1 parte en 10^5) en la distribución angular de la radiación cósmica de fondo. Estas fluctuaciones eran básicamente la huella de ondas "acústicas" (debidas a la competición de gravedad y presión de radiación) en el universo primitivo en el momento en que se desacoplaron la materia y la radiación. Con el paso del tiempo, las inhomogeneidades en la distribución de materia dieron lugar a la formación de galaxias. Por su parte, las fluctuaciones primordiales de la temperatura de la radiación se traducen, teniendo en cuenta la expansión del Universo, en inhomogeneidades en la distribución angular de la radiación cósmica que hoy se mide. La traducción depende de que la geometría del universo sea esférica (universo cerrado), hiperbólica (universo abierto) o plana (el caso límite entre los anteriores), lo que a su vez implica que la densidad del universo sea mayor, menor o igual que la densidad crítica, respectivamente. Ahora, dos experimentos distintos, Máxima y Boomerang, han explorado un sector de $2,5^\circ$ del cielo con una precisión de dos décimas de grado. Sus resultados son compatibles con las predicciones de un modelo de universo plano, de modo que la densidad total de materia-energía del universo coincide con el valor crítico.

Por otra parte, también se ha obtenido el mapa galáctico más completo realizado hasta la fecha. Sobre esta base se ha estimado un valor de $\Omega = 1/3 \Omega_c$ para la densidad de materia. De acuerdo con el experimento Boomerang, casi toda esta materia sería materia bariónica, lo que deja muy poco lugar para la materia oscura en forma de neutrinos o partículas exóticas.

Los 2/3 restantes corresponderían así a la llamada energía oscura, que es otro nombre para la constante cosmológica que Einstein introdujo inicialmente en sus ecuaciones, aunque luego se arrepintiera de ello.



Preparando el experimento Boomerang en la Antártida.

Hasta hace apenas 3 años, los bursters de rayos gamma eran uno de los fenómenos más misteriosos del universo; ni siquiera se sabía con certeza si eran de origen galáctico o extragaláctico. Hace 3 años, la identificación afortunada de un burster con una fuente visible permitió afirmar su naturaleza extragaláctica. Ahora se ha descubierto un burster con un desplazamiento hacia el rojo de 4,5 que corresponde a una distancia de 11.000 millones de años-luz, lo que le convierte en el más lejano detectado hasta la fecha. Parece así que los bursters pueden estar ligados al colapso de estrellas de la primera generación, muy masivas y de corta vida.

La estrella *Epsilon Eridani* es una de las más próximas a nuestro Sistema Solar, a tan sólo 10,5 años-luz. Quizá por ello ha sido siempre una de las estrellas favoritas en los

escritos de ciencia-ficción y por la que empezó, en los años 60, el Proyecto Ozma de F. Drake en busca de señales extraterrestres. Ahora se ha descubierto en torno a esta estrella un planeta con una masa y órbita similar a la de Júpiter. Es el planeta extrasolar más próximo de los aproximadamente 50 descubiertos en los cinco últimos años.

FÍSICA DE PARTÍCULAS

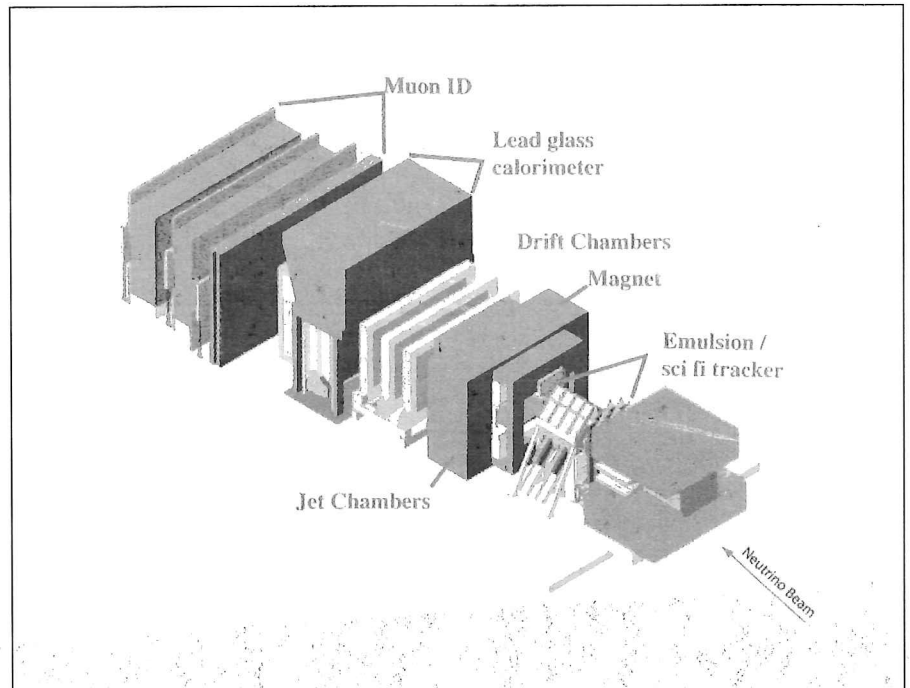
Hoy en día es una rutina atrapar átomos en trampas magnéticas: para ello se les frena primero mediante radiación láser. Aunque mucho menor que los átomos, los neutrones también tienen momento magnético, por lo que también podrían ser atrapados en trampas. El problema es que no pueden frenarse mediante radiación. En su lugar, se hace pasar un haz de neutrones fríos a 11K por un recipiente rodeado de electroimanes y lleno de helio-4 superfluido. Algunos neutrones pierden energía por choques con los núcleos de helio y pueden ser atrapados a temperaturas por debajo de 1 mK. Además, el propio helio actúa como detector de centelleo cuando los neutrones se desintegran. Así se espera medir la vida media del neutrón con una preci-

sión de una parte en 10^5 , frente al 1% actual, lo que puede ser importante para discriminar las diversas teorías propuestas acerca de la nucleosíntesis primordial.

El electrón tiene dos hermanos mayores: el muón μ , descubierto en 1962 y con una masa unas 200 veces mayor, y el tauón τ , descubierto en 1975 y unas 17 veces más pesado que el muón. El modelo estándar asigna un neutrino a cada uno de estos leptones. Los neutrinos electrónico y muónico fueron detectados hace tiempo, pero hasta ahora no se había conseguido detectar el neutrino tauónico, aunque nadie dudaba de su existencia. El primer problema es que, debido a la débil interacción de los neutrinos, hay que conseguir un haz muy intenso de ellos. Esto se consigue dirigiendo un haz de protones a 800 GeV contra un blanco de tungsteno; los productos de la colisión se filtran y sólo se deja pasar a los neutrinos, un 10% de los cuales son de tipo tauónico. Más adelante, estos neutrinos tauónicos se lanzan contra un blanco en el que alternan capas de hierro y de emulsión; el choque de los neutrinos con los hadrones genera nuevos tauones que más tarde se desintegran en leptones más ligeros. Toda esta serie de procesos es la firma de los neutrinos tauónicos. El problema es que la vida media de los tauones es muy pequeña (30×10^{-13} s) y apenas tienen tiempo de recorrer 1 mm antes de desintegrarse. Por ello es necesario un diseño muy cuidadoso del blanco para detectar todo el proceso.

FÍSICA CUÁNTICA

Hasta ahora, la comprobación de las desigualdades de Bell exigía medidas de correlación entre pares de partículas en estados enmarañados, y dependía fuertemente de la estadística. Hace diez años, aproximadamente, Greenberger, Horne y Zeilinger idearon un experimento que involucraba la medida simultánea de tres fotones y permitía comprobar la no localidad cuántica sin necesidad de calcular correlaciones



Esquema del detector de muones tauónicos.

estadísticas. Para ello se crean dos pares de fotones por subconversión paramétrica (mediante un pulso de luz ultravioleta y un cristal óptico) y se hacen pasar por divisores de haz tras los cuales hay cuatro detectores. Según la mecánica cuántica, en el caso en que los detectores detectan cuatro fotones simultáneamente, tres de ellos deben estar en un estado de Greenberger-Horne. Puesto que cada medida de espín individual puede dar sólo dos valores, hay ocho resultados posibles para la medida de la polarización de los tres fotones. De estos ocho resultados posibles, cuatro de ellos son compatibles con la mecánica cuántica, mientras que los otros cuatro son compatibles con la hipótesis de realismo local. De este modo, una única medida simultánea permite decidir entre ambas.

El gato de Schrodinger en su caja estaba en una superposición coherente de estados vivo y muerto. Al abrir la caja el gato pasa a estar vivo o muerto. El paso de una superposición coherente de estados distintos a una superposición incoherente se denomina decoherencia. En realidad, la decoherencia es inducida por el entorno: los estados del sistema están enmarañados con

el entorno, y es al promediar sobre las variables del entorno cuando se pierde la información sobre las fases relativas de los estados superpuestos. Para un sistema macroscópico el tiempo de decoherencia es prácticamente nulo, es decir, la decoherencia es instantánea. Sin embargo, para un sistema simple el tiempo de decoherencia puede ser apreciable. Ahora se ha medido el tiempo de decoherencia para un ion de Be. Inicialmente, el ion está atrapado en una trampa magnética en un estado con dos niveles superpuestos y ello da lugar a efectos de interferencia medibles. Cuando se induce decoherencia mediante campos eléctricos en la trampa, o mediante láseres, los efectos de interferencia desaparecen gradualmente de acuerdo con la teoría.

Un buen candidato para la observación de estados cuánticos superpuestos a escala mesoscópica es un SQUID (dispositivo superconductor de interferencia cuántica). Éste se trata de un anillo superconductor que contiene una o más uniones Josephson. Por el anillo circulan corrientes cuyas intensidades dependen del flujo magnético que encierra el anillo. Por efecto túnel entre dos estados de flujo pueden observarse efectos de interferencia que indican

una superposición coherente entre corrientes que circulan simultáneamente en sentidos contrarios. La diferencia entre ambas corrientes es del orden del microamperio, lo que indica que está involucrado un número de electrones suficientemente alto para poder ser considerado un efecto mesoscópico.

Se ha diseñado un sistema que permite construir estados enmarañados de N partículas. Se han conseguido así estados enmarañados de 4 iones de berilio. En principio, la misma técnica puede utilizarse para obtener estados enmarañados con un número mayor de partículas, lo que tendría importantes aplicaciones en las tecnologías de información cuántica.

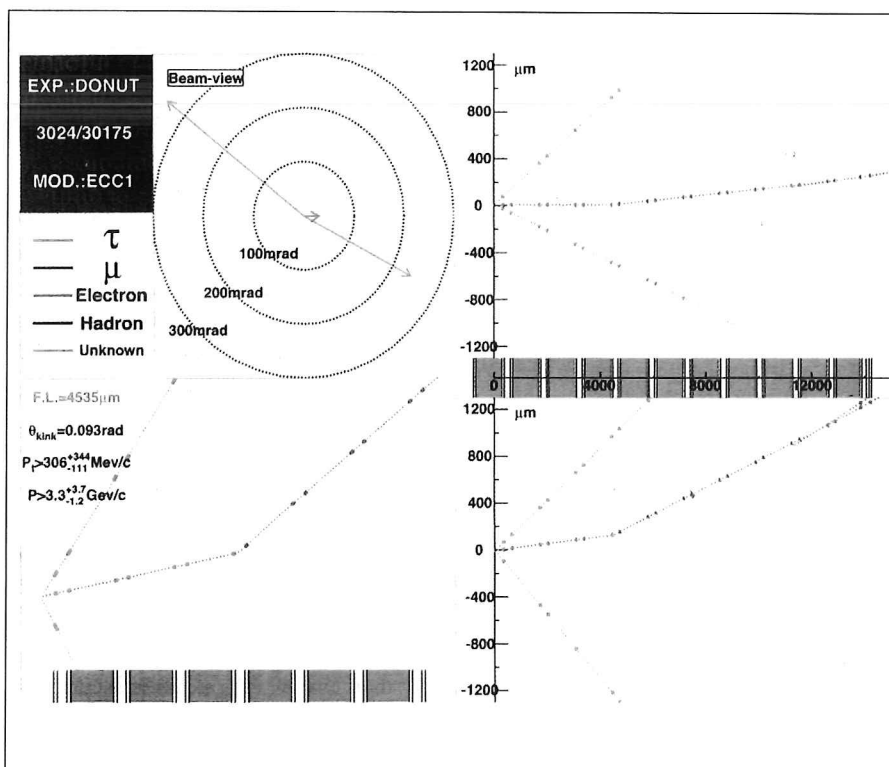
MATERIA CONDENSADA

Desde que en 1995 se encontraron los primeros condensados de Bose-Einstein, se planteó la posibilidad de crear condensados moleculares. Esto se ha conseguido ahora en un condensado de átomos de Rb^{87} a 130 nK mediante la estimulación por láser de transiciones a estados ligados. Un primer láser da lugar a una molécula en un estado excitado, que más tarde pasa al estado fundamental estimulada por un segundo láser. Así se han podido medir por primera vez las interacciones entre moléculas del condensado. Por otra parte, se han creado condensados de átomos de Rb^{85} cuyas interacciones pueden variarse de forma continua

modo competitivos. En 1997 se observó coexistencia entre ferromagnetismo y superconductividad en una aleación de oro e indio a temperaturas de μK , pero se pensaba que el fenómeno sería inobservable cuando la temperatura de la transición ferromagnética estuviese por encima de la superconductora. (Ver 100cias@uned, n°1, Novedades en Física.) En la superconductividad se aparean electrones de espín opuesto próximos al nivel de Fermi (aunque también pueden hacerlo electrones del mismo espín). En un metal que ya estuviera en estado ferromagnético uno de los electrones que se aparean tendría que venir de niveles muy alejados del de Fermi, y eso reduciría la temperatura de la transición superconductora. Sin embargo, ahora se ha comprobado que el UGe_2 ferromagnético pierde su resistencia sin expulsar el campo. Ambas fases sólo coexisten entre 1 y 1,5 atmósferas y por debajo de 1 K.

Por otra parte, se pensaba que el flujo magnético sólo puede entrar en un superconductor en vórtices minúsculos con un cuanto de flujo $\phi = h/2e$. Sin embargo, ya Bardeen y Ginzburg sugirieron que la intensidad de los vórtices podría depender de la distancia al borde. Ahora se han encontrado flujos magnéticos mucho menores en una delgada película superconductora de Al . Al exponer el disco a un campo magnético, éste penetra a saltos, pero algunos de ellos son tan pequeños como $0,001 \phi$. El efecto es muy sensible a la forma del borde.

Aparte del He^3 y He^4 , cuya fase superfluida es bien conocida, el candidato más obvio para la superfluididad es el hidrógeno. El problema es que el H tiene el punto triple a 13,8 K, por lo que tiende a hacerse metálico a bajas temperaturas. Para mantener el hidrógeno líquido por debajo de esta temperatura, se forman gotas de 14 y 16 moléculas de parahidrógeno rodeadas por una capa de He^4 o He^3 . Cuando el He se evapora en vacío se alcanzan temperaturas de 0,38 K o 0,15 K, respectivamente. Para comprobar si el H se ha hecho superfluido, en el



Análisis de las trazas en el detector de muones.

Un requisito esencial para la construcción de un computador cuántico es la posibilidad de corregir errores. Ello requiere que la evolución temporal de un subsistema cuántico sea controlada por un segundo subsistema. Ahora se ha propuesto una puerta lógica con tolerancia de error utilizando la fase de Berry del primer subsistema como parámetro de control.

desde un régimen repulsivo a un régimen atractivo variando el campo magnético externo. Cuando se llega al régimen atractivo el condensado colapsa sobre sí mismo expulsando parte de los átomos exteriores. Cuando se vuelve al régimen repulsivo el supercondensado vuelve a expandirse.

Superconductividad y ferromagnetismo son fenómenos en cierto

centro de la gota se coloca una molécula de OCS (carbonilsulfuro). Midiendo por espectroscopía de absorción los movimientos rotacionales de la molécula de OCS se puede ver si ésta está acoplada al parahidrógeno o se mueve libremente. (Ver 100cias@uned, n.º 2, Noveidades en Física, para rotación de moléculas en He.) Los experimentos parecen confirmar que es esto último lo que sucede.

FÍSICA DE MATERIALES

Los espejos dieléctricos se construyen a partir de varias capas de materiales transparentes diferentes. La interferencia constructiva de la luz reflejada en las diferentes capas da lugar a una reflexión total. Sin embargo, la intensidad de la luz reflejada disminuye con el ángulo de incidencia. Ahora se ha construido un nuevo tipo de espejo dieléctrico (a partir de poliéster y polimetil metacrilato, que son polímeros birrefringentes) que refleja la luz a cualquier ángulo. Entre las aplicaciones está la mejora de la transmisión de luz por guías.

El Premio Nobel de Química de 2000 fue concedido por el descubrimiento y desarrollo de los polímeros semiconductores. Durante este mismo año, una impresionante serie de trabajos realizados por Bertarm Batlogg y colaboradores en los Bell Labs han puesto de manifiesto en materiales orgánicos (tetraceno y pentaceno, que son cadenas con cuatro y cinco anillos bencénicos) toda una serie de propiedades insospechadas: superconductividad, acción láser, transistores de efecto campo e incluso efecto Hall cuántico. Esto abre un enorme campo para la electrónica en dispositivos flexibles donde los materiales orgánicos sustituirán al tradicional AsGa. También Batlogg ha encontrado superconductividad en fullerenos sin dopaje químico, alimentando electrones mediante un dispositivo de efecto campo.

La magnetorresistencia es el cambio en la resistencia eléctrica inducido por un campo magnético.

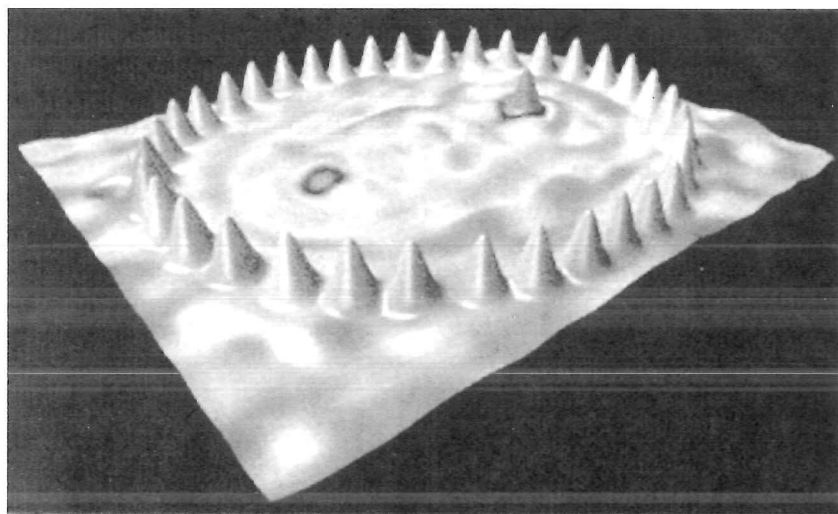
En 1988 se descubrió la llamada magnetorresistencia gigante en materiales compuestos de capas alternas de hierro y cromo. La razón última está en que el campo magnético alinea los espines nucleares y ello reduce la dispersión de los electrones de conducción, lo que a su vez da lugar a una drástica disminución de la resistencia eléctrica. Este efecto es el que se utiliza actualmente en la mayoría de las cabezas lectoras de los discos de ordenador. En 1993 se descubrió la magnetorresistencia colosal, un efecto aún mayor y también negativo. En este caso, la explicación está en una transición metal-semiconductor inducida por el campo magnético. En 2000 se ha descubierto un efecto de magnetorresistencia mucho mayor, y positivo. Esta vez el efecto no se basa en ninguna propiedad magnética de los materiales sino en la gran diferencia entre las conductividades eléctricas de los componentes. Una corona circular entre 0,5 y 0,2 mm de InSb está rellena de una película de oro. En ausencia de campo magnético, la corriente pasa por el oro. En presencia de campo, algunos portadores son obligados a moverse por el InSb, que presenta una resistencia mucho mayor. Si se llegasen a conseguir anillos con un tamaño de 1μ se podrían hacer cabezas de lectura mucho mejores sin los problemas asociados a las estructuras magnéticas.

ÓPTICA

Un pulso de luz está compuesto de ondas monocromáticas de diferentes frecuencias. La velocidad de propagación del pulso es la velocidad de la envolvente de las ondas. En un medio dispersivo normal, las ondas de mayor frecuencia de propagación a menor velocidad, y la velocidad de grupo es siempre menor que c . Lo contrario ocurre cerca de una línea de absorción, pero en este caso el efecto es enmascarado por la fuerte absorción de la luz. Una forma alternativa de obtener dispersión anómala es con un medio amplificador (previamente excita-

do). En este caso las ondas de menor frecuencia se propagan con mayor velocidad dentro del medio, y la velocidad de grupo es mayor que c . Lo que hay que ver ahora es lo que significa la velocidad de grupo. De hecho, la energía del pulso no se ha transmitido a velocidad mayor que c . Lo que ocurre es que el medio excitado ha cedido su energía a las ondas de menor frecuencia, y esta cesión se compensa con la energía absorbida de la parte más avanzada del pulso incidente que ya ha penetrado en el medio. El resultado final es que del medio dispersivo sale un pulso reconstruido antes incluso de que haya entrado la totalidad del pulso incidente. No obstante, hay que tener en cuenta que este adelanto es sólo de 60 ns frente a los aproximadamente 300 ns de anchura total del pulso.

El índice de refracción de un medio es $n = (\epsilon\mu)^{1/2}$ siendo ϵ la constante dieléctrica y μ la susceptibilidad magnética del medio. Si ϵ y μ son positivos, n es positivo y se obtiene la refracción normal en donde un rayo de luz se acerca a la normal cuando entra en un medio con índice mayor. Si ϵ es negativa y μ positiva, el índice de refracción es imaginario, la luz es absorbida. ¿Qué pasa si ϵ y μ son negativos? En este caso n es real pero negativo: un rayo de luz que penetrara en un medio con índice de refracción negativo no sería absorbido pero su ángulo de refracción sería negativo y el haz refractado estaría en el mismo lado de la normal que el haz incidente. Algunos materiales tienen ϵ negativa a frecuencias ópticas, y muchos otros lo tienen a frecuencias de MHz. El problema es cómo conseguir una μ negativa. Esto se ha hecho superponiendo una estructura de anillos conductores que actúan como espiras magnéticas. Variando la intensidad que circula por las espiras puede conseguirse una μ efectiva negativa. Un efecto notable es que una lámina plano paralela puede concentrar la luz. En general, podrían construirse lentes con un alto poder de resolución y una mínima aberración esférica. También se pueden dar curiosas discrepancias



Espejismo cuántico.

entre la propagación de las ondas y la propagación de la energía.

VARIOS

Es bien sabido que aunque las moléculas levógiras y dextrógiras son igualmente probables, en la Naturaleza las moléculas de una quiralidad predominan sobre otra. (Esto sucede en las moléculas orgánicas de la vida terrestre, pero también se ha visto esta asimetría en aminoácidos encontrados en meteoritos). Este fenómeno ya intrigó a Pasteur, quien buscó una explicación en la presencia de campos magnéticos estáticos en el instante de la formación primordial de estas moléculas. Sin embargo, esta explicación no es válida pues los niveles energéticos de los enantiómeros son iguales en un campo magnético. Ahora se ha demostrado que un campo magnético estático aplicado en combinación con un rayo de luz puede dar lugar a esta asimetría. La idea es que las moléculas levógiras absorben más luz que las dextrógiras cuando el campo es paralelo al rayo, y menos si es antiparalelo. A mayor absorción de luz hay también mayor ritmo de disociación molecular y ello reduce el número de moléculas de ese tipo.

Por primera vez se ha creado un espejismo cuántico. Mediante un microscopio de efecto túnel se ha creado un corral elíptico formado

por 36 átomos de cobalto. En uno de los focos de la elipse se coloca un átomo de Co adicional cuyo momento magnético interacciona con las ondas de superficie y da lugar a efecto Kondo. Lo realmente notable es que el mismo efecto se observa en el otro foco de la elipse, donde no hay ningún átomo.

Un equipo japonés de Hitachi ha construido un microscopio electrónico de emisión de campo de 1 Megavoltio con una estabilidad de 0,5 voltios. El equipo permite imágenes con una precisión de 1Å y tomar fotografías a 60 imágenes por segundo, lo que permite estudiar la evolución de partículas absorbidas en superficies. Este aparato es así un serio rival para los microscopios de efecto túnel en el estudio de estructuras y procesos en superficies sólidas.

De la misma forma que lo conductividad eléctrica en un alambre delgado está cuantizada en unidades de $2e^2/h$, también existe un cuanto de conductividad térmica dado por $g_0 = \pi^2 k^2 T/3 h$, que es del orden de 10^{-12} W/K. Esto se debe a que a medida que se estrecha el alambre metálico, se limita el paso a la propagación de fonones de corta longitud de onda. En el límite sólo se propagan los modos cuya frecuencia tiende a cero cuando la longitud de onda tiene a infinito. Para medir esta conductividad térmica se construye una membrana cuadrada de nitruro de silicio suspendida en el vacío por cuatro finos alambres del

mismo material. La membrana se calienta entonces depositando películas de oro en la membrana y conectándolas eléctricamente mediante cables de niobio superconductor. La disipación de la energía térmica a través de los alambres de suspensión da la medida del cuanto de conductividad. Esta cuantificación de la conductividad térmica podría suponer algún día un límite para la disipación de calor en dispositivos electrónicos cada vez más pequeños.

Pese a los 200 años transcurridos desde el experimento de Cavendish (ver 100cias@uned, n.º 1, Novedades en Física) la constante G sigue siendo la constante fundamental peor conocida. En 1987, CODATA recomendaba un valor para G con una incertidumbre de 128 ppm. Sin embargo, algunos experimentos recientes con resultados que se apartan de la media han hecho que la última recomendación de CODATA amplíe esta incertidumbre hasta 1500 ppm. Posteriormente se han publicado resultados que afirman tener una imprecisión de sólo 14 ppm. Un problema todavía abierto en las medidas de la interacción gravitatoria es el de la determinación exacta de la dependencia $1/r^2$ a distancias submilimétricas. Esto ha cobrado un gran interés a raíz de algunas teorías que tratan de explicar la minúscula intensidad relativa de la interacción gravitatoria mediante la inclusión de dimensiones extra que estarían enrolladas en una escala mucho mayor que la de Planck, y que se manifestarían en una variación importante de la G efectiva a tales distancias.

En 1983 se predijo la existencia de la llamada fase hexática de los cristales líquidos, caracterizada por un orden orientacional de largo alcance pero orden posicional de corto alcance. Esta fase se ha observado ahora en muestras de ADN.