

Gases de Fermi atrapados ópticamente

Unos pocos cientos de miles de átomos, enfriados casi al cero absoluto, simulan la física de otros sistemas singulares, como las estrellas de neutrones y los superconductores

John E. Thomas y Michael E. Gehm

El cuenco, que apenas mide un milímetro de largo por una décima de milímetro de ancho, tiene paredes de pura luz. Un recipiente etéreo, como exige su contenido, un conjunto de átomos de litio enfriados a menos de una millonésima de grado por encima del cero absoluto. Pero no debemos pensar que esa muestra atrapada en la vasija de luz es una mera nube de litio (al igual que no pensamos que un diamante sea un cúmulo de carbonos). Su verdadero valor se encuentra, no en los átomos que la componen, sino en su singular configuración: la de un gas de Fermi degenerado. Se trata de un nuevo estado de la materia; quizá, de cuantos pueda haber en una mesa de laboratorio, el estado más próximo a una estrella de neutrones y a la materia quark del universo primigenio.

Aunque predicha la existencia de los gases de Fermi degenerados hacia los años treinta del siglo pasado, no se creó uno realmente independiente, en el laboratorio, hasta hace algo más de un lustro. Lo más parecido que conocíamos era la nube de electrones del interior del cobre o de cualquier metal común. A pesar de la solidez del metal, los electrones se comportan como un gas: cuentan con libertad para moverse (por eso conducen electricidad los metales), pero sus energías han de seguir un estricto orden jerárquico, el mismo hallado en los gases de Fermi degenerados que hemos producido.

Estos gases están relacionados con otro curioso ente cuántico que aparece a temperaturas muy bajas: el condensado de Bose-Einstein. El equipo de Eric Cornell y de Carl Wieman, de la Universidad de Colorado, creó el primero de esos condensados en 1995. (En el año 2001, Cornell y Wieman fueron galardonados por su trabajo con el Premio Nobel junto con Wolfgang Ketterle, del Instituto Tecnológico de Massachusetts, MIT).

El gas atómico degenerado de Fermi resulta más difícil de crear porque enfrenta entre sí dos preceptos de la mecánica cuántica: el principio de indeterminación de Heisenberg y el principio de exclusión de Pauli. El pri-

mero establece que la posición de una partícula se hace más ambigua cuanto mejor se conoce su velocidad. En un gas ultrafrío, la velocidad de los átomos se conoce con una gran precisión: casi cero. Por lo tanto, los átomos se expanden en manchas de diez a mil veces mayores que los átomos a temperatura ambiente. Estos borrones no representan un problema para el condensado de Bose-Einstein, porque lo componen átomos “sociables”, de la familia de los bosones, que gustan de solaparse. Pero el gas de Fermi degenerado está formado por átomos aislados, del tipo de los fermiones (como el litio de nuestra trampa), los cuales, de acuerdo con el principio de exclusión de Pauli, no pueden compartir el espacio con sus vecinos. Fabricar uno de estos gases viene a ser como querer guardar globos en un armario.

Recientemente, nuestro grupo ha podido examinar la naturaleza cuántica de los globos expandiendo su tamaño por medio de una estratagema cuántica: recurrir a las interacciones fuertes, que ligan átomos entre sí a distancias mucho mayores que las ordinarias. Existen algunos indicios interesantes, todavía no probados, de que las interacciones fuertes hacen que los átomos se agrupen en “pares de Cooper”. La presencia de pares de Cooper explica la superconductividad y algunos tipos de la superfluidez. Pero antes de que describamos las propiedades más notables del gas, tomémonos unos momentos para detallar los grandes obstáculos técnicos que hubo que superar.

Enfriamiento por láser

La creación de sistemas cuánticos macroscópicos, como los gases de Fermi degenerados y los condensados de Bose-Einstein, ha sido posible gracias a los avances técnicos del enfriamiento óptico. En la mayoría de los experimentos con gases ultrafríos, los campos magnéticos atrapan a los átomos. Los cuencos ópticos utilizan, en cambio, campos eléctricos, que tienen la particularidad de acorrallar cualquier clase de átomo, mientras que las trampas magnéticas actúan sólo sobre ciertos tipos.

En el caso más simple, un cuenco óptico consiste en un intenso rayo láser muy enfocado hacia una determinada región donde se ha hecho un vacío casi perfecto. La luz dirige los átomos o moléculas frías hacia el punto focal, donde los confina en un entorno sin calor y sin fricciones, ideal para el estudio de los fenómenos fundamentales.

¿Por qué un haz de luz enfocado atrae a los átomos? La luz es una onda electromagnética, formada por campos magnéticos y eléctricos oscilantes. El campo eléctrico de un rayo de luz ejerce una fuerza sobre las partículas con carga, y los electrones y los protones del átomo están cargadas. Un átomo, no obstante, tiene el mismo número de electrones y protones y, por lo tanto, es eléctricamente neutro. Aun así, aparece una fuerza, por una razón un tanto sutil: el gradiente del campo.

Si, por ejemplo, el campo eléctrico apunta hacia arriba y hacia el foco, el núcleo de un átomo, cargado positivamente, que se encuentre debajo del haz de luz será atraído hacia arriba, mientras que su nube electrónica, de carga negativa, sufrirá una atracción hacia abajo. El núcleo, al estar más cerca del foco del haz, donde el campo eléctrico es mayor, experimentará una atracción un poco superior a la repulsión de la nube de electrones. Habrá, pues, una fuerza neta hacia arriba que actuará sobre los átomos. Si la situación fuera a la inversa, con el campo eléctrico apuntando al revés que el haz de luz, los núcleos se alejarían y la nube de electrones se acercaría. La fuerza neta seguiría estando dirigida hacia el foco. Por razones demasiado complejas para explicarlas aquí, sucede lo mismo con los átomos situados a lo largo del eje del haz de luz, aunque por delante y por detrás del foco. Por lo tanto, sin importar en qué dirección apunta el campo eléctrico, el átomo será siempre atraído suavemente hacia el interior.

La palabra clave es “suavemente”. A temperatura ambiente, o incluso muy por debajo de ella, los movimientos térmicos aleatorios de un átomo superan con creces el débil empuje del láser. Para encerrar los átomos en un cuenco óptico se ha de utilizar un láser de gran potencia y enfriar el entorno hasta temperaturas



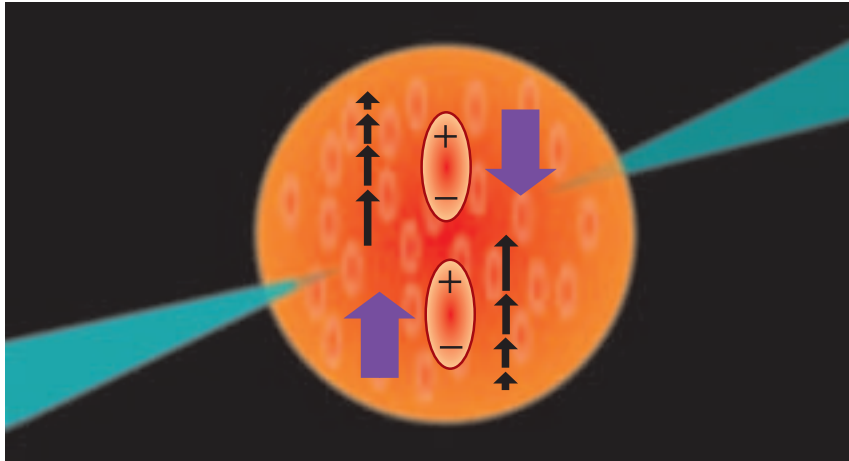
1. LOS EXPERIMENTOS CON GASES DE FERMI ULTRAFRIOS ayudan a comprender la física de sistemas extremos; entre ellos el interior de las estrellas de neutrones, como la creada tras la explosión de supernova de la Nebulosa del Cangrejo (*arriba*). Las estrellas de neutrones no se convierten en agujeros negros; lo impide la “presión de Fermi”, consecuencia ésta del principio de exclusión de Pauli.

bajísimas, de suerte que los átomos se muevan muy despacio. El láser de dióxido de carbono que empleamos en nuestros experimentos posee una intensidad en el punto focal de dos millones de watt por centímetro cuadrado, más que suficiente para cortar el acero. Pese a tamaña intensidad, el cuenco óptico sólo es capaz de confinar átomos cuya temperatura inicial sea inferior a una milésima de grado por encima del cero absoluto. (Hablando con precisión técnica, los átomos, individualmente considerados, no poseen temperatura *per se*. Pero no cuesta convertir su energía cinética a un equivalente de temperatura, que nos dice la frialdad que debe tener el gas para que permanezca dentro del cuenco óptico).

Puesto que los átomos han de estar muy fríos para poder apresarlos

con un rayo láser, la creación del cuenco óptico es la segunda parte de un procedimiento que consta de tres. Primero, enfriamos varios cientos de miles de millones de átomos de litio hasta temperaturas de 15 millonésimas de grado por encima del cero absoluto con una trampa magnetoóptica, método hoy ya corriente.

Esa trampa emplea seis rayos láser rojos, ordenados en tres pares ortogonales. Cada par de láseres frena a los átomos de litio en una única dirección mediante el efecto Doppler. Desde la perspectiva de un átomo en movimiento, el rayo láser que se propaga en dirección opuesta parece tener una frecuencia mayor; para el átomo es como un “viento de cara” crecido. Al propio tiempo, el rayo láser que se propaga en la misma dirección que el átomo tendrá, desde



2. SE PUEDEN ATRAPAR LOS ATOMOS NEUTROS de una nube de gas enrarecida y fría (*nube naranja*) con un “cuenco óptico”, un láser intenso (*azul*) que conduce los átomos hacia su foco. El campo eléctrico oscilante del láser provoca que los núcleos atómicos con carga positiva se separen de los electrones cargados negativamente. Puesto que el campo eléctrico (*flechas negras*) es mayor cerca del foco, la fuerza en el lado positivo del átomo no queda compensada del todo por la fuerza opuesta en el lado negativo. Así, debajo del haz de luz la fuerza ejercida hacia arriba sobre la parte superior del átomo supera ligeramente a la fuerza ejercida hacia abajo sobre su parte inferior. De igual forma, por encima del haz de luz, la fuerza hacia abajo ejercida en la parte inferior del átomo supera a la fuerza hacia arriba sobre la parte superior. Por lo tanto, en todos los casos aparece una fuerza neta (*flechas de color magenta*) que empuja a los átomos hacia el interior.

el punto de vista del átomo, una frecuencia menor: un “viento de cola” atenuado. Puesto que estos efectos aumentan con la velocidad del átomo, la luz del láser parecerá actuar como una fuerza viscosa. Esta es la razón por la que uno de los inventores de la trampa magnetoóptica, el premio Nobel Steven Chu, de la Universidad de Stanford, acuñó la muy apropiada expresión “melaza óptica”.

Sin estas “melazas”, un átomo que entrase en nuestro cuenco óptico lo atravesaría sin más, igual que una canica tirada contra una fina taza de té la agujereará. La trampa magnetoóptica equivale a llenar de miel la taza; la canica llegaría al fondo del cuenco frenada casi del todo. Parecía, pues, que teníamos que poder inactivar las melazas una vez cargado el cuenco óptico y retener en éste los átomos durante mucho tiempo.

Al menos, en teoría. En la práctica, los cuencos ópticos no funcionaron como se esperaba hasta finales de los años noventa, cuando nuestro grupo descubrió el causante de su destrozo. Los átomos oscilan dentro de un cuenco óptico con una frecuencia característica: en nuestros experimentos, oscilan 6600 veces

por segundo en la dirección corta y 230 veces por segundo en la larga. (Esta segunda frecuencia resulta menor porque la atracción hacia el centro del cuenco óptico es más débil que en la dirección axial.) Los láseres que se utilizaban no eran estables; presentaban fluctuaciones de intensidad que duplicaban la frecuencia de los átomos en la trampa.

Para hacernos una idea del problema que ello supone, imaginemos un átomo oscilando de lado a lado en un cuenco cuyas paredes vibren hacia dentro y hacia afuera. El movimiento hacia dentro de un lado del cuenco empuja al átomo. Cuando alcanza el otro lado (a la mitad de su período de oscilación), se encuentra con el otro extremo de la pared, que de nuevo se mueve hacia dentro. Y el átomo recibe un nuevo empujón. Una y otra vez las paredes agitan al átomo hacia delante y hacia atrás, hasta echarlo del cuenco en unos segundos.

Resolvimos este problema en 1999 al construir un láser diseñado para operar sin tales oscilaciones de intensidad. Logramos atrapar los átomos durante cinco minutos, un tiempo cientos de veces mayor que en cualquier cuenco óptico anterior.

Desde entonces, hemos reemplazado este láser con una unidad comercial sumamente estable y más potente; ahora podemos contener los átomos durante casi siete minutos.

Tras confinar los átomos en el cuenco, aún no están lo suficientemente fríos para que sucedan los fenómenos cuánticos. Hay que enfriar aún más en el tercer y último paso: el enfriamiento por evaporación. No existe nada extraño en este proceso; está inspirado en la manera en que se enfría una sopa. Cuando chocan dos átomos, en ocasiones consiguen unir sus energías y uno de ellos gana el ímpetu necesario para escapar de la trampa o “evaporarse”. El otro se frena. Entonces colisiona con otros átomos de la trampa, enfriándose, y el proceso continúa. Con el tiempo, los átomos están tan enfriados, que incluso dos de ellos juntos no suman la energía necesaria para que uno escape. En este punto finaliza la evaporación y se estanca el enfriamiento. Para solventar el nuevo contratiempo, disminuimos poco a poco la intensidad del rayo láser atrapador: bajamos los bordes del cuenco óptico. De ese modo, algunos de los átomos más calientes puedan escapar. Así perdemos una tercera parte de los átomos, pero los que quedan están tan fríos, que forman el gas de Fermi degenerado.

Efectos cuánticos

Según la mecánica cuántica, la materia exhibe propiedades de partícula y de onda. Cuando a una partícula, un electrón o un átomo completo, se la considera una onda, se dice que tiene asociada una “longitud de onda de De Broglie”, que determina el “tamaño” efectivo de la partícula. La longitud de onda de De Broglie varía con la inversa del momento. Al aumentar el momento, como ocurre en un acelerador de partículas, la onda se hace muy pequeña. (Por eso se necesitan aceleradores de partículas para explorar los diminutos componentes de los átomos.) Con un momento muy pequeño —es el caso de nuestra trampa óptica—, el átomo se expande como un globo. A estas temperaturas tan bajas, el globo tiene un diámetro de casi una micra, tamaño resoluble con un buen microscopio.

Si la longitud de onda de De Broglie crece demasiado, los glo-

bos empezarán a tocarse e intentarán solaparse. En este momento, el gas recibe el nombre de “degenerado”; su comportamiento no viene gobernado por las leyes de la física clásica, sino por las reglas cuánticas.

El Yin y el Yang

Desde los años treinta, se sabe que las partículas cuánticas se agrupan en dos categorías: bosones y fermiones. Los bosones idénticos son partículas gregarias: prefieren ocupar los mismos estados de energía que sus vecinos. Esa es la naturaleza de los fotones (las partículas de la luz); se ve en los láseres, donde los fotones de una determinada energía estimulan a los átomos para que emitan más fotones de la misma energía.

Las partículas de las que está compuesta la materia común —los protones, electrones y neutrones— son fermiones. Su comportamiento difiere mucho del de los bosones. Tal y como Enrico Fermi y P. A. M. Dirac descubrieron, estas partículas rehúyen la compañía. Dos fermiones con el mismo “espín” no pueden ocupar el mismo nivel de energía ni la misma región del espacio. (El “espín” de una partícula guarda relación con la orientación de ésta en un campo magnético. Hay espín hacia arriba y espín hacia abajo.) Este comportamiento presenta consecuencias de peso en la vida cotidiana. Explica la tabla periódica de los elementos. La segunda fila de la tabla periódica, por ejemplo, cuenta con ocho elementos porque la segunda capa electrónica de los átomos tiene otros tantos huecos para los electrones. Dos electrones nunca pueden ocupar el mismo hueco, porque son fermiones.

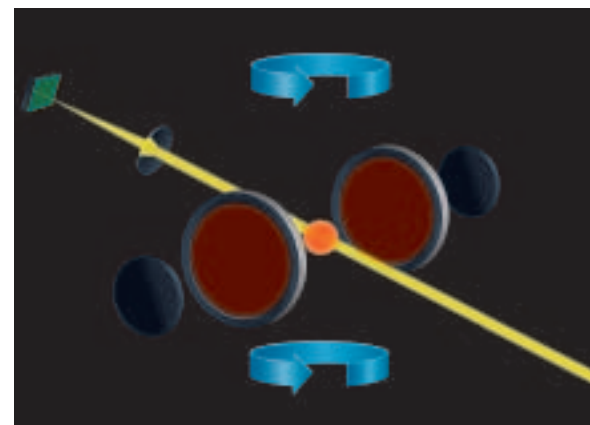
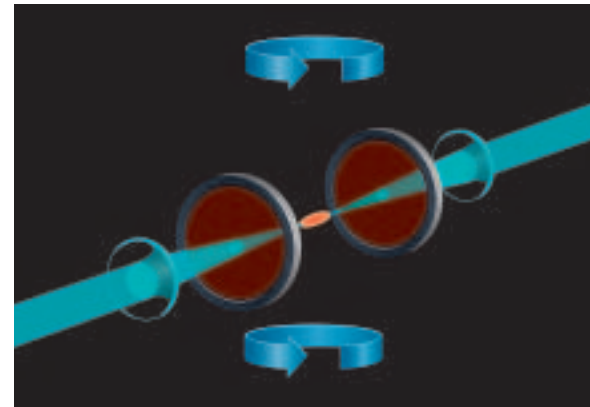
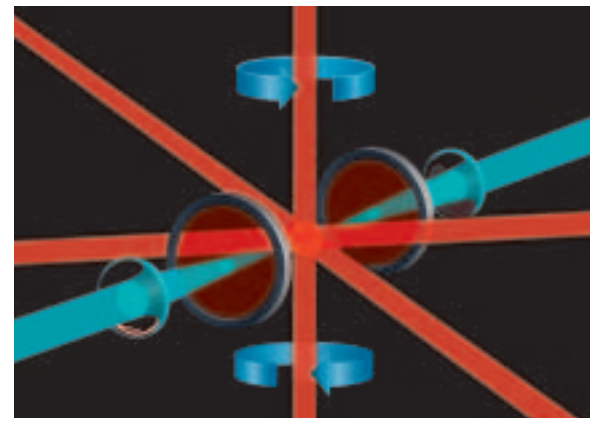
Las partículas compuestas, entre ellas los átomos y las moléculas, actúan como fermiones si están formadas por un número impar de fermiones, y como bosones si contienen un número par. Por tanto, el ⁶litio, con tres protones, tres neutrones y tres electrones, es un fermión compuesto, mientras que el ⁷litio, que cuenta con un neutrón más, es un bosón compuesto. A temperaturas corrientes, los dos isótopos presentan propiedades químicas similares, pero a temperaturas ultrabajas salen a luz sus diferentes personalidades cuánticas.

Cuando un gas de bosones compuestos, así uno de ⁷litio, se enfría

3. LA CREACION Y ESTUDIO POSTERIOR de un gas de Fermi degenerado comienzan con una nube de átomos de litio, a los que se frena con seis rayos láser dirigidos hacia el interior de una trampa magnetoóptica (*líneas rojas en el diagrama superior*), donde se genera una “melaza óptica”. (Las flechas azules en forma de anillos indican la dirección de la corriente en dos parejas de bobinas adyacentes, generadoras de un campo magnético.) Una vez que los átomos se han enfriado a 150 millonésimas de grado por encima del cero absoluto, quedan confinados en el “cuenco óptico” por un haz láser enfocado (*verde*). Puesto que la fuerza es mayor en la dirección perpendicular al haz que en la longitudinal, el cuenco produce una nube de átomos con forma de puro (*centro*). Al disminuir poco a poco la intensidad del láser, algunos de los átomos se escapan, enfriando los que quedan hasta 50 milmillonésimas de grado por encima del cero absoluto. El gas está “degenerado” a esta temperatura: se trata de un estado muy organizado, que se comporta como un átomo supergigante. Los autores estudiaron este fenómeno apagando el láser que creaba el cuenco óptico, con lo que el gas se expandía. Obtuvieron una secuencia de imágenes de la evolución de la nube mediante pulsos cortos de luz de láser (*amarillo en la imagen de abajo*) que atraviesa el gas antes de incidir en una cámara (*verde*). El comportamiento de la nube durante la expansión “recuerda” su pasado de gas de Fermi degenerado.

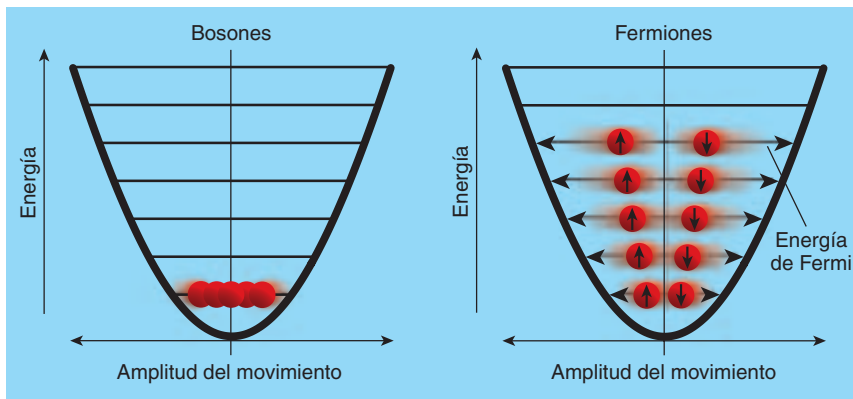
en un cuenco óptico, ocurre una rápida transición en el momento de la degeneración (la “temperatura de transición”). De repente, el gas cambia de clásico, con los átomos en varios niveles de energía, a gas en el que todos los átomos tienen la misma energía, la menor permitida por el contenedor. Es decir, todos los átomos oscilan con la mínima energía y la mayor longitud de onda posibles. Vibran al unísono, como si fueran un átomo enorme: un condensado de Bose-Einstein.

Cuando un gas de fermiones compuestos, por ejemplo uno de ⁶litio, se enfría hasta la temperatura de transición (llamada “temperatura de Fermi” en el caso de los fermiones), ocurre una transformación diferente: los átomos se agrupan por sí mismos



de manera muy organizada; dos están en el mínimo estado energético permitido, otros dos en el siguiente estado de menor energía, y así sucesivamente, como si fueran electrones de un átomo regular. El resultado final es un gas de Fermi degenerado.

Poco después de que Cornell y Wieman crearan el primer condensado de Bose-Einstein, se intentó producir un gas atómico degenerado de Fermi. (Recuérdese que los gases de Fermi degenerados de electrones ya se conocían, en cualquier metal conductor.) En 1999 Deborah Jin, de la Universidad de Colorado, lo logró con potasio-40 y una versión modificada de las trampas magnéticas de Cornell y Wieman. Por desgracia, el método de Jin no es aplicable a todos los átomos. A otros grupos de investigadores les llevó más tiempo desarrollar técnicas



4. TODOS LOS ATOMOS DE UN CONDENSADO DE BOSE-EINSTEIN se encuentran en el mismo nivel de energía, el mínimo disponible (*izquierda*). En un gas de Fermi degenerado, en cambio, sólo dos átomos (con espín nuclear opuesto) pueden compartir el mismo nivel de energía (*derecha*). En virtud de ello, los átomos de este gas se distribuyen en una serie de niveles energéticos, hasta alcanzar el nivel correspondiente a la temperatura de Fermi. Cuanto mayor sea el nivel de energía del átomo, más amplio resultará el movimiento oscilatorio dentro de la trampa.

generales. En el año 2001, los equipos de Randy Hulet, de la Universidad Rice, de Christophe Salomon, de la Escuela Superior Normal francesa, y de Ketterle, del MIT, consiguieron el objetivo enfriando los fermiones con bosones encerrados dentro de la misma trampa magnética. Hulet y Salomon demostraron que el gas de fermiones de litio-6 ocupa un volumen mucho mayor que el litio-7 bosónico. Esta diferencia procede de que los fermiones hayan de ocupar niveles distintos de energía; algunos deben entonces moverse en órbitas de gran radio, mientras que los bosones se agrupan en el estado de menor energía y gozan de un pequeño radio de movimiento.

Al mismo tiempo, nuestro equipo de la Universidad de Duke también creó gases de Fermi degenerados cuya temperatura no llegaba ni a una décima de la temperatura de Fermi. Utilizamos métodos de enfriamiento exclusivamente ópticos. Estos gases muy degenerados son bastante estables y exhiben propiedades espectaculares en cuanto se los somete a “interacciones fuertes” como las que mencionamos en la introducción.

La magia de las interacciones fuertes

En un gas común, los choques entre átomos escasean mucho y duran muy poco, de ahí que en los átomos no influyan en gran medida sus vecinos. Este no es el caso de los gases de

Fermi con interacciones fuertes degenerados, donde los átomos se empujan unos a otros y se encuentran casi en un estado de colisión constante.

La palabra “colisión” o “choque” es quizás un tanto drástica para describir el comportamiento de estos gases. Se suele emplear el término “interacción”, más neutro. Pero no se deben confundir estas interacciones de gran distancia con las fuerzas clásicas. Una interacción ocurre cuando dos partículas intentan compartir el mismo estado real de energía; o bien lo hacen amigablemente (como es el caso de los bosones), o luchan por ello (el caso de los fermiones). La distancia a la cual las partículas “notan” la presencia de otras partículas se denomina longitud de dispersión. Se dice que una interacción es fuerte si su longitud de dispersión es grande. En los últimos años, se ha demostrado que resulta posible cambiar la longitud de dispersión mediante la aplicación de campos magnéticos, aumentarla cuanto se necesite e incluso cambiar su signo, de atractiva a repulsiva.

¿Por qué resulta posible? Para empezar, nuestro gas de Fermi degenerado contiene en realidad dos poblaciones de fermiones, una con el espín hacia arriba y otra con el espín hacia abajo. La prohibición de que dos fermiones ocupen el mismo espacio no se aplica a fermiones con espín opuesto. Por lo normal, los átomos de litio-6 con espín opuesto no

perciben la existencia de los otros; su longitud de dispersión es casi nula.

Cuando aplicamos un campo magnético, cambia la energía magnética interna del átomo, que actúa como una barra imantada. Si la energía total de una pareja de átomos de espín opuesto coincide con la de una molécula diatómica, los átomos interactúan fuertemente. En cierto sentido, el campo magnético engaña a los átomos; les lleva a creer que se encuentran en una molécula. Este fenómeno se denomina “resonancia de Feshbach” en honor del físico del MIT Herman Feshbach, que lo predijo. Cuando el campo magnético se ajusta correctamente, los átomos sienten la presencia de otros átomos que, desde un punto de vista atómico, se encuentran a distancias enormes.

Mas, ¿cuán enorme? La longitud de onda de De Broglie impone una limitación: si dos átomos están más separados que la longitud de De Broglie, no se influirán mutuamente; sería como dos globos que pasaran el uno junto al otro sin tocarse. En un gas de Fermi, la longitud de dispersión no puede superar la longitud de onda de De Broglie, que a su vez no debe ser mayor que el espacio entre partículas (para evitar que algunos fermiones de mismo espín se solapen).

Pero a temperaturas muy frías, la longitud de onda de De Broglie crece hasta coincidir con el espacio entre átomos. Además, cuando se ajusta de manera conveniente el campo magnético, la resonancia de Feshbach dilata la longitud de dispersión hasta su máximo valor posible: la longitud de onda de De Broglie. Por lo tanto, cuando se combinan las temperaturas ultrabajas con un campo magnético bien ajustado, la longitud de dispersión, la longitud de onda de De Broglie y el espacio entre partículas valen lo mismo.

Nuestro equipo fue el primero en observar el curioso fenómeno que ocurre cuando se prepara un gas de estas características y a continuación se elimina el contenedor apagando el cuenco óptico. Al principio, el gas atómico atrapado presenta la misma forma que el cuenco óptico: un puro largo, estrecho y fino. Al liberarse los átomos, el gas se expande radialmente (en la dirección estrecha del puro)

mientras permanece casi inmóvil en la dirección axial (la dirección larga del puro). Es una consecuencia de las fuerzas de presión que sufre el gas: cada pequeña porción gaseosa es impelida hacia fuera por la presión del gas de atrás y hacia dentro por la presión del gas que tiene delante. Es decir, el gradiente de presiones determina la fuerza hacia fuera, que es mayor en las direcciones radiales del puro. En un gas común, los átomos dejan de ejercer una presión mutua en cuanto hallan una vía de escape. Pero en nuestro gas de Fermi con interacciones fuertes, los propios átomos (en realidad sus “globos” cuánticos) continúan expandiéndose hasta medir tanto como el espacio que hay entre ellos; el gradiente de presiones persiste, pues, durante bastante tiempo. Esta metamorfosis sigue produciéndose incluso cuando el gas deja de interactuar, porque, mientras los átomos se muevan libremente, su velocidad radial será mayor que la axial. La nube gaseosa se expande mucho más deprisa radialmente que longitudinalmente; su forma cambia, de puro a calabaza.

Debido a las interacciones fuertes, los gases de Fermi degenerados exhiben también “comportamiento universal”. Valen así de modelo de muchos otros sistemas físicos naturales. “Universal” significa aquí que todos los sistemas de Fermi con interacciones fuertes (cualquier sistema cuya longitud de dispersión coincida con la separación entre partículas) se comportan de forma análoga. No importa que los fermiones sean átomos, electrones, quarks o cualquier otra cosa. La manera en que estos sistemas, tomados en su conjunto, interactúan es siempre similar. Por esta razón, el gas de Fermi degenerado de nuestro laboratorio sirve de modelo experimental para investigar las últimas teorías sobre los quarks o las estrellas de neutrones. La transformación morfológica que observamos en nuestro gas recuerda mucho al comportamiento dinámico que se les ha predicho hace poco a los plasmas de quarks y gluones.

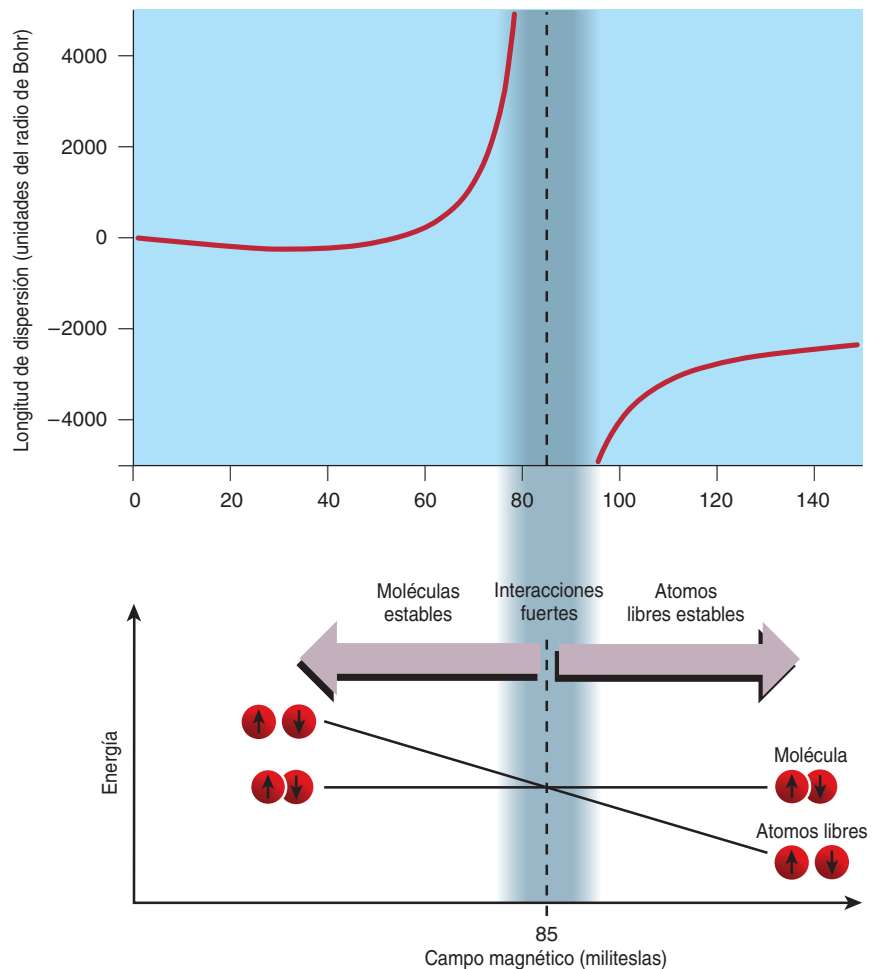
Hemos intentado también determinar con experimentos la “energía neta de interacción” de un gas de Fermi con interacciones fuertes, es decir, la energía total de atracción o repulsión de una partícula sobre

todas las que estén en su radio de alcance. Se puede demostrar que en un sistema universal esta cantidad es proporcional a la energía cinética media de las partículas.

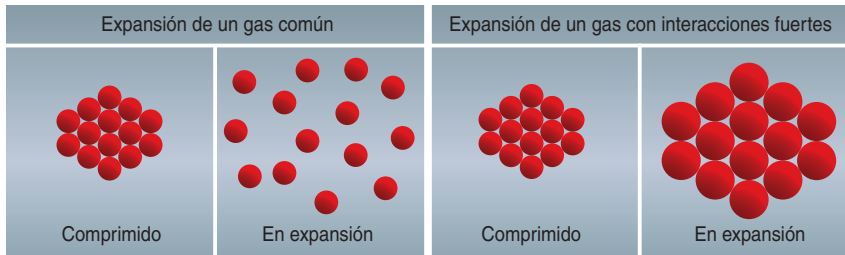
De la constante de proporcionalidad, beta, depende la estabilidad mecánica del sistema. La energía cinética da lugar a una repulsión entre los fermiones interactivos, la presión de Fermi, que, al tender a separarlos, libra a las estrellas de neutrones del colapso gravitatorio y da estabilidad mecánica a nuestro gas atrapado. Pero la energía neta

de interacción también es fuente de una presión, que puede empujar hacia dentro o hacia fuera en razón del signo de la constante de proporcionalidad. Si beta fuera menor que -1 , la presión hacia el interior debida a la energía de interacción sería mayor que la presión de Fermi hacia fuera, y el sistema se hundiría sobre sí mismo.

Los físicos nucleares han venido batallando durante treinta años para calcular beta. La complejidad de esta tarea se debe a que requiere calcular interacciones donde participan mu-



5. LA RESONANCIA DE FESHBACH altera el comportamiento de un gas de Fermi degenerado. A ese fenómeno se debe que la distancia a la cual los átomos influyen unos sobre otros —la “longitud de dispersión”— aumente drásticamente cuando se aplica un campo magnético de una intensidad determinada (*arriba*). (Una longitud de dispersión positiva significa repulsión; negativa significa atracción.) En el caso de los átomos de litio-6, la resonancia de Feshbach ocurre a la intensidad de 85 militeslas. En un campo magnético menos intenso, la molécula posee una energía menor que una pareja de átomos libres. Un campo magnético más intenso favorece energéticamente a los átomos libres (*abajo*). Cerca de la resonancia, los átomos libres y los que están ligados en moléculas se comportan de forma análoga; eso explica el aumento sustancial de la longitud de dispersión, o lo que los físicos denominan “interacciones fuertes”.



6. EL COMPORTAMIENTO DE LOS GASES DE FERMI con interacciones fuertes cuando se expanden difiere del comportamiento de los gases normales. En un gas común, los átomos, una vez que se han liberado de un estado de compresión, rara vez interactúan entre sí. En un gas de Fermi, oscilan dentro de “globos cuánticos”, que se expanden a la vez que la separación atómica. En consecuencia, los átomos siguen ejerciendo una mutua presión de Fermi, interacción que opera a largas distancias.

chas partículas. La mejor estimación teórica se cifra en torno a $-0,5$. Es decir, la energía neta de interacción debería aplicar una fuerza hacia dentro cuya intensidad fuera la mitad de la ejercida por la fuerza expansiva de la presión de Fermi. Ello resulta coherente con la manifiesta estabilidad de las estrellas de neutrones. Ni que decir tiene que no se puede raspar un trozo de una estrella de neutrones y comprobar si ese valor es exactamente $-0,5$. Pero ahora hemos medido beta en nuestro laboratorio. Rudolf Grimm, de la Universidad de Innsbruck, y Salomon han efectuado después mediciones parecidas.

Nuestros primeros experimentos han determinado que beta vale $-0,26$. Hace poco, Salomon ha obtenido un valor de $-0,3$ a una temperatura superior, y Grimm ha medido valores más próximos a $-0,5$. Es demasiado

temprano para alcanzar un veredicto final, puesto que tanto los experimentos como los cálculos teóricos pueden adolecer de errores sistemáticos. Alienta la semejanza de todas las mediciones: se parecen tanto, que experimentadores y teóricos tendrán de qué hablar durante los próximos años.

La búsqueda de la superfluidez

Sandro Stringari, teórico de la Universidad de Trento, predijo el fenómeno del cambio de forma de los gases de Fermi con interacciones fuertes degenerados; lo hizo en 2002, antes de que se hubiese producido uno. Sostuvo, además, que esa metamorfosis quizá fuese una señal de superfluidez.

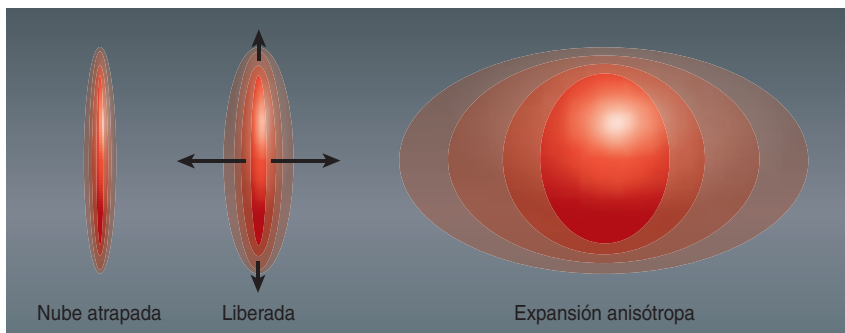
Los superfluidos, descubiertos en los años treinta, cursan sin ninguna fricción, como los electrones de

los materiales superconductores, que experimentan una resistencia nula. Los cables superconductores serían muy útiles, en especial para transmitir electricidad a largas distancias sin perder energía. En la práctica, sin embargo, los superconductores comunes sólo operan a temperaturas de unos pocos grados por encima del cero absoluto. Incluso los superconductores de “alta temperatura”, conocidos desde los años ochenta, han de enfriarse hasta la temperatura del nitrógeno líquido. La búsqueda de un superconductor operativo a temperatura ambiente constituye uno de los sueños de la física de la materia condensada.

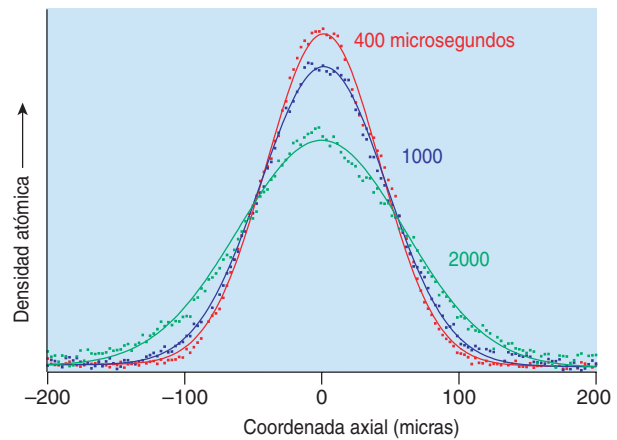
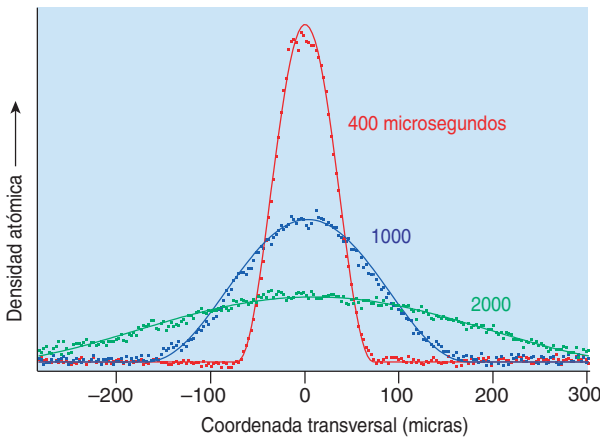
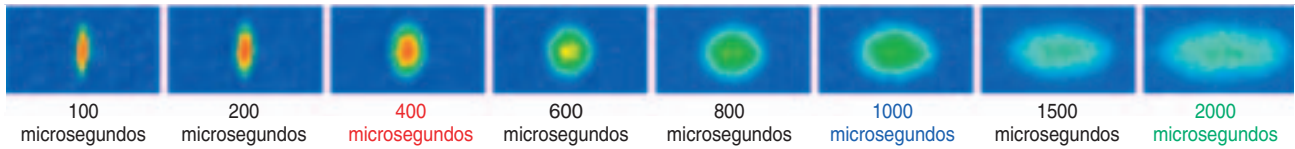
Los átomos de un superfluido imitan a los electrones de un superconductor; por esa razón, los gases de Fermi degenerados suponen una buena ayuda en esa búsqueda. Desde hace cincuenta años se sabe que los conductores se convierten en superconductores cuando los electrones de espín opuesto se emparejan y fluyen juntos a través de la red atómica. De forma análoga, un líquido de fermiones, de helio-3 por ejemplo, se convierte en un superfluido cuando los átomos forman parejas. Estas asociaciones débiles, no tan intensas como los enlaces moleculares, se denominan pares de Cooper.

En todos los superconductores conocidos, los pares de Cooper son estables sólo a temperaturas muy inferiores a la de Fermi: a temperaturas de entre 10 y 100 grados por encima del cero absoluto, una milésima o una centésima de la de Fermi. (La temperatura de Fermi de un metal —entendido como un gas de Fermi degenerado— resulta tan elevada porque contiene muchos electrones, muchos fermiones pues. Por ello, todos los niveles de energía se hallan ocupados hasta una energía muy alta. Los electrones más energéticos, los que se encuentran en la banda de conducción, tienen equivalentes de temperatura de diez mil grados).

Recientemente, tres grupos teóricos han predicho que los gases de Fermi con interacciones fuertes degenerados se convierten en superfluidos a temperaturas de hasta la mitad de la temperatura de Fermi. Si la teoría anda en lo cierto, estos sistemas producirían los pares de



7. LA TEORÍA PREDICE QUE LOS GASES DE FERMI con interacciones fuertes se expanden de manera anisótropa, una vez liberados de una trampa óptica. La presión disminuye más deprisa en la dirección radial hacia fuera de la nube elongada; por ello, el gas se expande a mayor velocidad en esa dirección que a lo largo del eje (flechas negras). En consecuencia, cambia de forma con el tiempo, de puro (izquierda) a calabaza (derecha). La presencia de esta expansión con cambio de forma revela la existencia de interacciones fuertes y, quizá, de superfluidez.



8. LOS DATOS DE LOS EXPERIMENTOS confirman la expansión anisotrópica de la nube de gas de átomos de litio-6. La secuencia de imágenes muestra el cambio de forma y densidad de la nube de gas a medida que se calienta. El gas sigue siendo degenerado y con interacciones fuertes durante al menos 400 microsegundos tras el momento en que se lo libera (se muestra en las tres primeras

imágenes). Después de esos 400 microsegundos, la alta velocidad inicial de los átomos hace que la nube siga cambiando de forma, aunque los átomos hayan dejado de interactuar. Las mediciones cuantitativas de estas imágenes demuestran que la expansión es más rápida en el eje radial de la nube (gráfica de la izquierda) que en el longitudinal (gráfica de la derecha).

Cooper de mayor temperatura que se conocen en física; donde mayor debe reputarse en cuanto fracción de la temperatura de Fermi. Varios equipos, incluido el nuestro, han creado gases degenerados a temperaturas del orden de una décima de la temperatura de Fermi. Quizá hayamos conseguido así ya superfluidos de alta temperatura. Sin embargo, no existen pruebas experimentales sólidas que lo ratifiquen.

Parecerá engañoso hablar de un superfluido de “alta temperatura” cuando en realidad su temperatura es menor que una millonésima de grado por encima del cero absoluto. Pero no lo es. Pensemos en la siguiente analogía. Cuando se proyecta un nuevo avión, se empieza por unos esquemas sobre el papel y unos modelos a escala, y se llega a construir un prototipo. En nuestro caso, vale como “esquema sobre el papel” el concepto de sistema universal de Fermi. El “modelo a escala” es el gas de Fermi con interacciones fuertes degenerado. Está a escala tanto en la temperatura como en el tamaño físico. El principio universal establece que el cambio de escala no modifica las propiedades fundamentales del sistema. Si el modelo a escala no funcionara, tendríamos

razones para sospechar que los pares de Cooper no se pueden formar a la temperatura de Fermi. Pero si el modelo funciona —si puede haber pares de Cooper a temperaturas que sean una fracción sustancial de la de Fermi—, podría suceder lo mismo con un conductor. Cabe dentro de lo verosímil que algún día se creen materiales que superconduzcan incluso a dos mil grados o más: no

ya a temperatura ambiente, sino a temperaturas mucho mayores.

De cualquier modo, creer que habrá superconductores calientes en un futuro cercano es soñar demasiado. Esperemos, al menos, que los nuevos resultados obtenidos de los trabajos con gases de Fermi degenerados nos lleven hasta los materiales superconductores de muy alta temperatura.

Los autores

John E. Thomas, “profesor distinguido Fritz London de física” de la Universidad Duke, pertenece a la Sociedad Americana de Física. **Michael E. Gehm** obtuvo su doctorado en física en el año 2003 mientras trabajaba en el equipo de investigación de Thomas. Actualmente disfruta de una plaza postdoctoral en el Centro Fitzpatrick de Sistemas Fotónicos y de Comunicaciones de la Universidad Duke.
©American Scientist Magazine.

Bibliografía complementaria

- OPTICAL DIPOLE TRAPS FOR NEUTRAL ATOMS. R. Grimm, M. Weidemüller e Y. B. Ovchinnikov en *Advances in Atomic, Molecular & Optical Physics*, vol. 42, págs. 95-165; 2000.
- OBSERVATION OF FERMI PRESSURE IN A GAS OF TRAPPED ATOMS. A. G. Truscott, K. E. Strecker, W. I. McAlexander, G. B. Partridge y R. G. Hulet en *Science*, vol. 291, págs. 2570-2572; 2001.
- ALL-OPTICAL PRODUCTION OF A DEGENERATE FERMI GAS. S. R. Granade, M. E. Gehm, K. M. O’Hara y J. E. Thomas en *Physical Review Letters*, vol. 88, pág. 120405; 2002.
- OBSERVATION OF A STRONGLY INTERACTING DEGENERATE FERMI GAS OF ATOMS. K. M. O’Hara, S. L. Hemmer, M. E. Gehm, S. R. Granade y J. E. Thomas en *Science*, vol. 298, págs. 2179-2182; 2002.