

FÍSICA

DEMONIOS, ENTROPÍA Y LA BÚSQUEDA DEL CERO ABSOLUTO

Un experimento imaginario del siglo XIX se ha
convertido en un procedimiento factible
para alcanzar temperaturas
extremadamente bajas

Mark G. Raizen



Mark G. Raizen ocupa la cátedra Sid W. Richardson de física en la Universidad de Texas en Austin. Sus intereses comprenden las trampas ópticas y el entrelazamiento cuántico.



M

IENTRAS USTED LEE ESTAS PALABRAS, LAS MOLÉCULAS del aire vuelan a su alrededor a 3000 kilómetros por hora, más rápidas que una bala. Entre tanto, los átomos y las moléculas de su cuerpo se agitan, vibran y chocan entre sí. Nada en la naturaleza permanece jamás en completo reposo. Cuanto más rápido se mueve un cuerpo, más energía posee. La energía colectiva de átomos y moléculas se corresponde con lo que llamamos calor, y como tal lo percibimos.

Aunque la inmovilidad total —el estado que se corresponde con el cero absoluto de temperatura— resulta físicamente inalcanzable, los científicos se han aproximado cada vez más a dicho límite. En tales condiciones extremas, los efectos cuánticos comienzan a manifestarse y aparecen nuevos e inusuales estados de la materia. Al enfriar átomos en estado gaseoso hasta una fracción de grado por encima del cero absoluto, se ha observado el comportamiento ondulatorio de las partículas; gracias a ello se han construido los instrumentos de medida más precisos de la historia y relojes atómicos de una exactitud sin precedentes.

El punto débil de las técnicas de enfriamiento tradicionales reside en que funcionan solo con unos pocos elementos de la tabla periódica, lo que limita su utilidad. El hidrógeno, por ejemplo, el átomo más simple de todos, se resistió durante largo tiempo a ser enfriado. Ahora, sin embargo, nuestro equipo de investigación ha desarrollado un nuevo método que funciona con la mayoría de los elementos y con numerosos tipos de moléculas. Para ello hemos llevado a la práctica un experimento imaginario que James Clerk Maxwell ideó en el siglo XIX. El físico escocés teorizó sobre la posibilidad de un «demonio» que parecía violar las leyes de la termodinámica.

La técnica dará lugar a toda una gama de aplicaciones y abrirá nuevos caminos en investigación básica. Algunas de sus variantes quizá permitan purificar isótopos poco comunes y de gran utilidad en medicina. Otras mejorarán la precisión de los procesos de fabricación de circuitos integrados. Además, enfriar átomos y moléculas ayudará a explorar la tierra de nadie que se extiende entre la física cuántica y la química ordinaria, o las posi-

bles diferencias entre el comportamiento de la materia y de la antimateria. Y gracias al enfriamiento extremo del hidrógeno y sus isótopos, laboratorios pequeños podrán afrontar algunas cuestiones de física fundamental que, hasta ahora, han sido dominio exclusivo de los mastodónticos aceleradores de partículas.

VELOCES COMO BALAS

Detener y manipular átomos y moléculas no resulta tarea fácil. En un experimento típico, un sólido se calienta o se vaporiza con un láser para obtener un gas rarificado de algún elemento químico. Después, ese gas debe frenarse, confinarse en una cámara de vacío y mantenerse alejado de las paredes.

El primer paso de nuestro método de enfriamiento se basa en un truco bastante antiguo. Hace más de 40 años, se descubrió que, a una presión de varias atmósferas, un gas que escapase hacia el vacío a través de un pequeño orificio experimentaba un descenso de temperatura significativo a medida que se expandía. Una cualidad notable de estos haces es que resultan casi monoenergéticos; en otras palabras, todas las moléculas poseen una velocidad muy cercana al promedio. Si el haz escapa a 3000 kilómetros por hora, por ejemplo, la velocidad de cada una de sus moléculas se desviará de dicha cifra en no más de unos 30 km/h. A efectos de comparación, consideremos las moléculas del aire a temperatura ambiente: con una velocidad promedio de 3000 km/h, las hay que se desplazan a 1 km/h y también a 7000 km/h. Desde el punto de vista termodinámico, que un haz sea casi monoenergético quiere decir que, aunque posea una cantidad sustancial de energía, se encuentra extremadamente frío. Piénselo así: un observador que se moviera a la velocidad del haz, a 3000 km/h, vería que las moléculas se agitan tan despacio que les asignaría una temperatura de tan solo una centésima de grado por encima del cero absoluto.

Por tanto, si fuese posible frenar el haz sin arruinar esa pequeña dispersión en la distribución de velocidades, obtendríamos un conjunto de átomos muy fríos, los cuales podríamos atrapar y enfriar aún más. Junto a Uzi Even, químico de la Universidad de Tel Aviv, nuestro grupo empezó a trabajar en el proyecto en 2004. Nuestro primer intento consistió en construir un

EN SÍNTESIS

Los métodos tradicionales para enfriar gases hasta cerca del cero absoluto funcionan solo con algunos elementos químicos.

La conjunción de dos técnicas novedosas logra enfriar átomos de casi cualquier elemento e incluso algunas moléculas.

Una de las técnicas es una implementación física del célebre experimento imaginario conocido como «demonio de Maxwell».

Las aplicaciones abarcan el estudio de las partículas elementales, la separación de isótopos y las técnicas de nanofabricación.

rotor cuyas paletas, en sus extremos, se moviesen a la mitad de la velocidad del haz. Apuntamos este hacia las palas del rotor que se movían hacia atrás, de tal modo que la velocidad del haz justo se cancelase con la de los álabes. Cuando los átomos del gas rebotaran en el rotor, este absorbería toda su energía cinética; algo parecido a parar en seco una pelota de tenis con una raqueta que se desplaza hacia atrás.

El montaje, sin embargo, resultó difícil de manejar, ya que requería un ajuste demasiado fino. Robert Hebner, director del Centro de Electromecánica de la Universidad de Texas en Austin, sugirió un diseño diferente: proyectar el haz sobre la parte posterior de un proyectil que se desplazara a través de un cañón de bobinas. Un cañón de bobinas es un arma experimental que, en lugar de emplear una detonación de pólvora, dispara proyectiles tras acelerarlos en un campo magnético. El obús atraviesa una serie de bobinas por las que circula una corriente eléctrica, de manera que se crea un campo magnético a lo largo del cañón. El proyectil, que en esencia consiste en un imán, se ve atraído hacia el centro de la bobina por la que está pasando. En principio, una vez llegase al centro y lo sobrepasase, las mismas fuerzas comenzarían a tirar de él en sentido contrario, pero la corriente de cada bobina se interrumpe justo cuando el proyectil llega al punto medio, de tal manera que el campo magnético siempre impulsa al proyectil en el mismo sentido, a lo largo del eje del cañón.

Pronto me di cuenta de que podíamos aplicar la idea de Hebner, pero sin necesidad del proyectil. Usaríamos el mismo principio directamente sobre el haz para generar el efecto opuesto: en lugar de acelerar una bala, frenaríamos las moléculas. Semejante técnica resulta factible gracias a que la mayoría de los átomos poseen cierto magnetismo (propiedad que se extiende a todos los átomos cuyos electrones se encuentran excitados). Numerosas moléculas exhiben también un campo magnético.

Construimos el nuevo dispositivo y lo ensayamos primero con átomos de neón excitados y, después, con moléculas de oxígeno. Logramos detener ambas especies. De manera independiente, un grupo de Zúrich dirigido por Frederic Merkt había elaborado un dispositivo similar, con el que consiguieron detener hidrógeno atómico aproximadamente al mismo tiempo que nosotros realizábamos nuestros experimentos. Varios grupos de todo el mundo ya han construido sus cañones de bobinas para átomos. En definitiva, se trata de dispositivos muy simples y robustos, contruidos a partir de cable de cobre común, condensadores y transistores comerciales.

Tras detener átomos de esa manera, fue bastante sencillo atraparlos en campos magnéticos estáticos. El problema más arduo consistió en hallar un método para enfriarlos aún más. Aunque 0,01 grados Kelvin (una centésima de grado sobre el cero absoluto) parece frío, la cota queda muy lejos de los límites alcanzados con otras técnicas. Necesitábamos algo que nos permitiese ir más allá.

UN DEMONIO A NUESTRO SERVICIO

La solución se nos resistió largo tiempo. El enfriamiento por láser, inventado durante los años ochenta, ha cosechado un éxito enorme y ha permitido la creación del estado de la materia conocido como condensado de Bose-Einstein, logros que han sido recompensados con la concesión de los premios Nobel de física en 1997 y 2001. Pero las posibilidades del enfriamiento por láser se limitan, sobre todo, a los átomos de la primera columna de la tabla periódica, como el sodio o el potasio, ya que en ellos puede permutarse con facilidad entre el estado fundamen-

tal y un estado excitado, como requiere la técnica. Otro método consiste en el enfriamiento por evaporación. Este se basa en ir extrayendo de un material los átomos a mayor temperatura y dejar los más fríos (el mismo principio por el que el sudor, al evaporarse, nos refresca la piel). Pero, sin la ayuda del enfriamiento por láser, resulta muy difícil obtener una densidad lo bastante alta como para que comience la evaporación.

En febrero de 2004 visité la Universidad de Princeton y hablé con Nathaniel J. Fisch, experto en física de plasmas. Me hizo saber de una idea que acababa de poner en práctica para establecer una corriente de electrones a través de un plasma (un gas de electrones e iones positivos) mediante un ardid que induce el movimiento de los electrones en un sentido, pero no en el opuesto. Me pregunté si podríamos conseguir algo parecido con átomos o moléculas: construir una «puerta» que dejara pasar átomos en un sentido, pero no en otro.

Obviaré por un momento los aspectos técnicos relativos a la construcción de la puerta de un solo sentido y explicaré primero por qué un dispositivo de esta suerte ayuda a enfriar un gas. El primer paso consiste en reducir el volumen del gas, pero sin elevar su temperatura. Imaginemos un recipiente que consta de dos partes, una a la derecha y otra a la izquierda, separadas por una puerta. Los átomos del gas rebotarán al azar en el interior de la cavidad, por lo que antes o después atravesarán la puerta. Pero si esta les deja pasar solo en un sentido —de izquierda a derecha, pongamos por caso—, al final todos los átomos se concentrarán en la parte derecha. El aspecto crucial de todo el proceso reside en que, al atravesar la puerta, la velocidad de los átomos no se modifica, por lo que la temperatura del gas permanece constante. (Desde un punto de vista termodinámico, este procedimiento difiere por completo de comprimir el gas y empujarlo hacia la parte derecha; esto último sí aceleraría los átomos e incrementaría la temperatura del gas.) Después, hemos de dejar que el gas se expanda y recupere su volumen original. Cuando un gas se expande, su temperatura decrece, razón por la cual los botes vaporizadores se enfrían cuando los utilizamos. Como resultado final, el gas ocupa el mismo volumen que al principio, pero su temperatura ha disminuido.

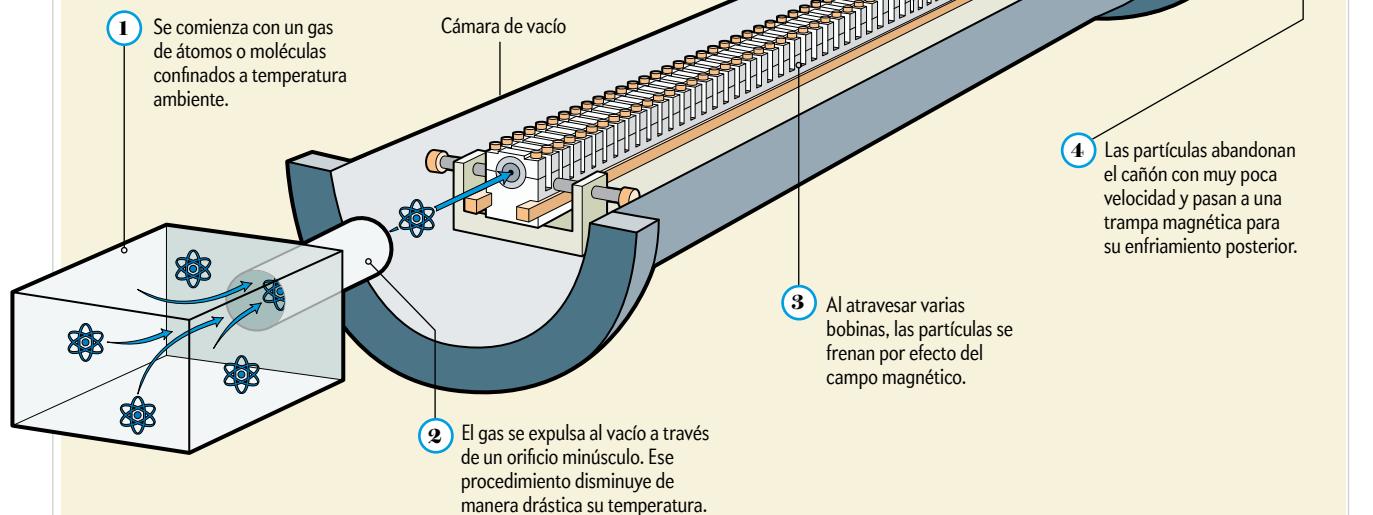
Lo desconcertante de la propuesta reside en que una compuerta que seleccione átomos de esa manera parece violar las leyes de la física. En el estado comprimido, el gas posee menos entropía (una cantidad que mide el desorden de un sistema) que al principio. Sin embargo, la segunda ley de la termodinámica dicta la imposibilidad de reducir la entropía de un sistema sin gastar energía y sin generar más entropía en otro sitio.

La paradoja se viene discutiendo desde que, allá por 1871, James Clerk Maxwell propusiese un experimento imaginario en el que «un ser inteligente con mano diestra» vigilase las partículas que vienen y van y abriese la puerta del modo apropiado. Esta hipotética criatura, hoy conocida como «demonio de Maxwell», parecía violar la segunda ley de la termodinámica, puesto que podía reducir la entropía de un gas mediante un gasto insignificante de energía. No sería sino hasta 1929 cuando Leo Szilard propuso una solución a la paradoja. Arguyó que, cada vez que la trampilla se abre, el demonio acumula información. Y esa información, razonaba, lleva entropía, la cual compensa exactamente el descenso de la entropía del gas. (Szilard se adelantó a su tiempo: decenios más tarde, la idea de que la información posee un significado físico real daría lugar al enfoque moderno de la ciencia de la información.)

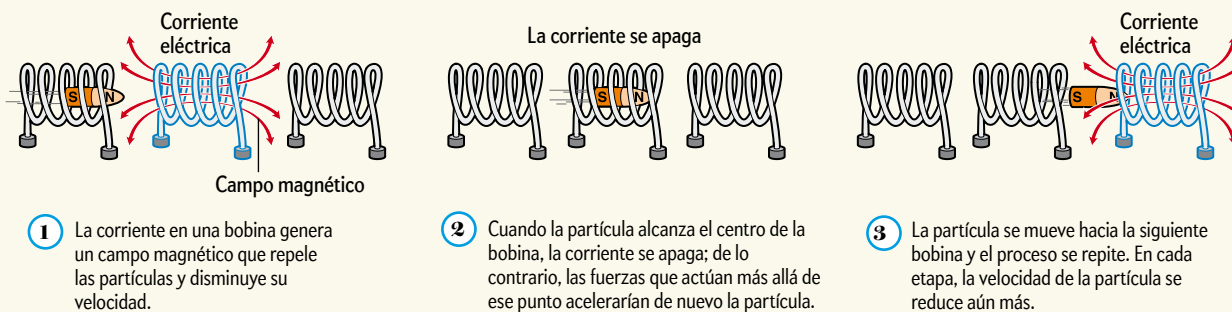
Durante decenios, toda consideración sobre el demonio de Maxwell —incluida la solución de Szilard— nunca dejó de ser

Freno magnético

En la primera etapa del proceso, un gas se enfría hasta temperaturas del orden de la centésima de grado Kelvin. Para ello, se inyecta un fino haz de partículas del gas hacia una cámara de vacío, lo cual disminuye su temperatura de manera drástica. Después, el haz se frena con un cañón de bobinas atómico. Los cañones de bobinas fueron concebidos como armas experimentales, diseñadas para acelerar proyectiles en campos magnéticos. El cañón de bobinas atómico aplica la misma idea para conseguir el efecto opuesto: frena cualquier átomo o molécula que posea un polo norte y un polo sur magnéticos, una propiedad que exhiben la mayoría de los elementos de la tabla periódica.



Funcionamiento del cañón de bobinas



pura especulación. Ahora, sin embargo, nuestro equipo ha desarrollado la primera realización física del experimento imaginario de Maxwell, tal y como él lo concibió. (Otros experimentos recientes han obtenido resultados similares mediante nanomáquinas en lugar de puertas). Gracias a nuestra técnica, logramos enfriar átomos a temperaturas de hasta 15 millonésimas de kelvin. Y, como veremos ahora, nuestro dispositivo no solo demuestra que es posible construir un demonio de Maxwell, sino también que Szilard se hallaba en lo cierto.

Para que la puerta de un solo sentido funcione, los átomos del gas deben poseer dos estados (dos configuraciones electrónicas posibles); ambos de baja energía y, por tanto, estables. Llamemos a tales estados «rojo» y «azul». Los átomos flotan en un recipiente al que un rayo láser divide por la mitad. El láser se sintoniza a una longitud de onda tal que los átomos rojos rebotan en él. Para estos, por tanto, el láser funciona como una

puerta cerrada. En un principio, todos los átomos son azules, por lo que pueden atravesar la barrera láser. Pero, justo a su derecha, incide sobre ellos un segundo láser, el cual se encuentra sintonizado a una frecuencia que induce la transición del estado azul al estado rojo. Dicha transición se logra mediante la dispersión de un solo fotón. Esos átomos rojos se ven ahora repelidos por el primer láser, por lo que quedarán confinados en la parte derecha. Al final, todos los átomos acabarán allí y la parte izquierda quedará vacía.

A principios de 2008 demostramos que la puerta funcionaba con rubidio atómico. Denominamos a nuestro método «enfriamiento con un solo fotón», para distinguirlo del enfriamiento con láser ya existente, el cual emplea una gran cantidad de fotones para cada átomo.

Mientras tanto, y sin que lo supiéramos, Gonzalo Muga, de la Universidad del País Vasco, y Andreas Ruschhaupt, ahora en

Más frío, más rápido... y más allá

Diodos atómicos, mejores técnicas de frenado y atajos a la adiabaticidad

GONZALO MUGA

Enfriar átomos a temperaturas próximas al cero absoluto constituye un reto técnico y científico cuya importancia resulta difícil de subestimar, puesto que representa un paso decisivo hacia el dominio exhaustivo de la materia. La velocidad del átomo es una cantidad vectorial, por lo que podemos intentar controlar su módulo, su dirección o su sentido. En los últimos treinta años se han conseguido avances significativos en los dos primeros aspectos. Las trampas magnéticas o las técnicas tradicionales de enfriamiento por láser permiten el control del módulo, mientras que para gobernar la dirección del movimiento pueden emplearse guías de onda: un haz láser cuya frecuencia se encuentre desintonizada hacia el rojo con respecto a la de una transición atómica actúa como una tubería que conduce átomos fríos. También pueden diseñarse caminos más complejos mediante campos magnéticos en cables de espesor nanométrico. De hecho, ya se construyen circuitos en los que, en lugar de electrones, se transportan y manipulan átomos.

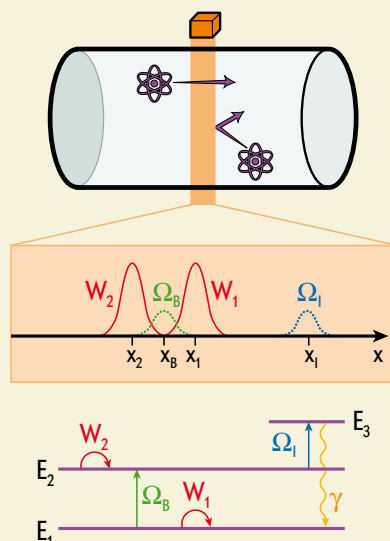
En 2004, junto a Andreas Ruschhaupt, por entonces estudiante postdoctoral en nuestro grupo de investigación en la Universidad del País Vasco, abordamos el proyecto de diseñar elementos de control *atomotrónico*; es decir, dispositivos que imitasen las propiedades de los componentes básicos habituales en electrónica. Uno de los componentes que carecían de análogo atómico era el diodo, un elemento que permite el paso de la corriente en un sentido, pero no en el opuesto.

¿Cómo conseguir que un átomo se mueva en un solo sentido? En principio, sabemos que

las leyes que rigen la dinámica de sistemas aislados son simétricas con respecto a la inversión temporal: si cierto proceso resulta posible (por ejemplo, que un átomo atraviese una barrera de izquierda a derecha), el proceso invertido (cruzar la barrera de derecha a izquierda) también está permitido. Sin embargo, la experiencia nos enseña que existen maneras de evitar este problema. Después de todo, existen los diodos electrónicos o las válvulas que controlan el flujo de líquidos. Tales dispositivos operan gracias a que, antes o después, tiene lugar un proceso irreversible —como la fricción— que rompe la invariancia frente a la inversión temporal. A escala atómica, uno de los procesos irreversibles resulta de la emisión espontánea de un fotón por parte de un átomo excitado.

Tras un periodo de ensayo y error, dimos con un modelo de diodo atómico que aprovechaba la estructura interna del átomo y su interacción con un láser. Dichas interacciones pueden ser resonantes (cuando la frecuencia del láser se sintoniza para que la energía de los fotones coincida con la diferencia de energías entre dos niveles atómicos) o desintonizadas. En el primer caso, se inducen transiciones entre niveles atómicos; en el segundo, se generan fuerzas atractivas o repulsivas, las cuales dependen de la frecuencia del láser y del estado interno del átomo.

Por simplicidad, consideremos un átomo con solo dos niveles internos, uno fundamental y otro excitado. En tal caso, un diodo atómico consta de dos haces láser cuyas frecuencias respectivas se ajustan para que cada uno de ellos ejerza fuerzas repulsivas sobre los átomos que se encuentran en un estado, pero no sobre los otros. Entre ambos, una zona de bombeo induce transiciones del estado fundamental al excitado. Si suponemos un montaje como el que muestra la figura, un átomo que



Diodo atómico

Una configuración adecuada de láseres permite a los átomos pasar en un solo sentido (*arriba*). Los láseres se disponen de izquierda a derecha tal y como indica la figura (*centro*): W_2 y W_1 funcionan como barreras de potencial (*rojo*) que solo afectan, respectivamente, a los átomos que se encuentren en el estado excitado E_2 o en el fundamental E_1 . El láser central (*verde*) induce transiciones desde el estado fundamental al excitado. De esta manera, los átomos en el estado fundamental que llegan desde la izquierda pueden atravesar la barrera. Tras hacerlo, retornan al estado fundamental mediante la emisión de un fotón (*amarillo*), la cual puede inducirse con ayuda de otro láser (*azul*).

la Universidad Leibniz en Hannover, habían desarrollado de manera independiente una idea similar. Desde entonces, junto a Muga y Ruschhaupt, hemos dilucidado algunos aspectos teóricos de la compuerta. En un artículo que publicamos juntos en 2006, señalamos que, cuando un átomo dispersa un fotón, este se lleva consigo algo de información sobre el átomo —y, con ella, un cuanto de entropía—. Además, mientras que el fotón original formaba parte de un tren de fotones ordenados (el haz láser), el fotón dispersado sale en una dirección arbitraria. De esta manera, crece el desorden entre los fotones. En nuestro trabajo demostramos que el aumento en la entropía de la luz compensaba exactamente la disminución de entropía que experimentaban los átomos. Por tanto, la técnica de enfriamiento con un único fotón funciona como un demonio de Maxwell justo como lo imaginó Leo Szilard en 1929. En este caso, se trata de

un demonio muy simple y eficiente: un haz láser que induce un proceso irreversible mediante la dispersión de un solo fotón. Nuestro demonio no es un ser inteligente ni un ordenador. No necesita tomar decisiones a partir de la información almacenada en los átomos: basta con que la información se encuentre disponible y, al menos en principio, pueda colectarse.

APLICACIONES

Un control tan fino del movimiento de átomos y moléculas abre grandes perspectivas. Desde hace tiempo se sueña con atrapar y enfriar moléculas para estudiar reacciones químicas en el régimen cuántico. El cañón de bobinas funciona con cualquier molécula magnética; además, sirve de complemento a otro método, el cual emplea campos eléctricos en vez de magnéticos para frenar moléculas con polarización eléctrica. Si las moléculas

se halle en el estado fundamental y que se aproxime desde la derecha a la zona iluminada se topará con la barrera y será reflejado. En cambio, si lo intenta desde la izquierda, no hallará en el primer láser obstáculo alguno; después será excitado, con lo que también sorteará la barrera de la derecha, y finalmente decaerá (de manera espontánea o inducida) al estado fundamental, con lo que quedará atrapado en la parte derecha del dispositivo. Este último paso, caracterizado por la emisión de un solo fotón, constituye el proceso irreversible del que hablábamos más arriba.

Si bien el láser de la izquierda puede parecer superfluo (pues, en principio, todos los átomos tienden a ocupar el nivel fundamental), su presencia es imprescindible para que el diodo funcione con eficacia. La razón obedece a que la presencia de los láseres de bloqueo, que actúan como barreras de potencial, modifica los niveles de energía internos de los átomos y, con ello, las transiciones involucradas en el proceso. El láser de la izquierda corrige ese efecto y hace que el bombeo funcione de la manera deseada.

Existen otras variantes del mecanismo que acabamos de explicar, como las desarrolladas por los laboratorios de Mark Raizen o de Dan Steck, de la Universidad de Oregón. El esquema anterior presenta dos ventajas fundamentales: por un lado, funciona en un amplio intervalo de velocidades atómicas; por otro, basta con una sola emisión espontánea. Ello lo diferencia de los métodos tradicionales de enfriamiento por láser, que requieren numerosas repeticiones del ciclo de bombeo y emisión, lo cual limita su aplicabilidad a un número reducido de especies atómicas.

Respecto al frenado de partículas mediante una superficie sólida en retroceso, el intento de Mark Raizen de utilizar un rotor mecánico cuenta con precedentes en la historia de la

criogenia. En general, cuando un átomo choca contra una pared que retrocede, pierde energía cinética. Puede demostrarse que, si la velocidad de la pared asciende a la mitad de la del átomo, este se detiene por completo. No obstante, el problema de este método reside en que la velocidad de las turbinas ha de ajustarse para que coincida con la mitad de la velocidad de las partículas del haz.

Interesados por el rotor mecánico de Mark Raizen y su grupo, Andreas Ruschhaupt y yo decidimos investigar otras estrategias. En 2009 dimos con un resultado que sorprendía por su sencillez: una pared cuya distancia a la fuente de pulsos de partículas fuese proporcional a la raíz cuadrada del tiempo transcurrido desde que se activaba el dispositivo detendría todas las partículas del pulso, con independencia de su velocidad inicial. Como demuestra un cálculo elemental, en ese caso todos los átomos chocan contra la pared en el momento en que la velocidad de esta es igual a la mitad de la velocidad de aquellos. El precio que hemos de pagar es la dispersión espacial de las partículas detenidas, lo cual planeamos evitar mediante un diodo atómico colocado frente a la pared, de manera que se cree una trampa móvil que acumule los átomos enfriados.

El método de Mark Raizen para frenar «proyectiles atómicos» con un cañón magnético inverso suscitó también nuestra curiosidad. En particular, nos planteamos lo siguiente: si se lanzase con una determinada velocidad media un proyectil de átomos encapsulados en una trampa gradual y móvil, ¿sería posible diseñar una trayectoria que detuviese los átomos en un momento y localización predeterminados? La respuesta es afirmativa. El desarrollo de la teoría y los experimentos correspondientes constituye en estos momentos el objetivo principal de nuestro grupo de investigación. La solución se basa en suponer primero la diná-

mica deseada y, a partir de ella, construir las interacciones necesarias. El análisis de los invariantes dinámicos (cantidades que se mantienen constantes durante la evolución de un sistema) facilita este tipo de diseños inversos.

Lo anterior permite acelerar procesos que, de otra manera, habría que realizar con suma lentitud a fin de evitar las excitaciones del sistema. Un análogo macroscópico de la clase de problemas de los que hablamos nos lo proporciona el transporte de un vaso con agua: ¿cómo debemos desplazar el vaso para que alcance una meta predeterminada con el agua finalmente en reposo y sin que se derrame por el camino? Si disponemos de un tiempo ilimitado, una solución pasa por transportarlo muy despacio. Pero ¿y si no? ¿Cómo conseguirlo en el menor tiempo posible?

En física cuántica, ese tipo de procesos muy lentos se denominan adiabáticos (en este contexto, el concepto de adiabaticidad difiere del empleado en termodinámica, donde se asocia a la ausencia de transferencia de calor). Por ello, denominamos a nuestros métodos de diseño de trayectorias rápidas «atajos a la adiabaticidad». Estos pueden aplicarse al lanzamiento, transporte o frenado de átomos e iones, a expansiones y compresiones, o a la preparación de estados atómicos. Todos estos procesos resultan muy comunes en los laboratorios de enfriamiento de átomos, pero realizarlos con demasiada lentitud resulta poco práctico, ya que, en procesos prolongados, las perturbaciones pueden destruir los delicados fenómenos cuánticos que tan a menudo constituyen el principal objeto de estudio de la física de temperaturas ultrabajas.

Gonzalo Muga es catedrático del departamento de química física de la Universidad del País Vasco y coordinador del grupo QUINST (Quantum Information, Science and Technology): <http://tp.lc.ehu.es/qist>

las son lo bastante pequeñas, el enfriamiento con fotones individuales debería disminuir la temperatura hasta el punto en que comenzasen a dominar los efectos cuánticos. Las moléculas se comportarían como ondas deslocalizadas que tomarían parte en reacciones químicas a distancias mucho mayores que las habituales, sin necesidad de la energía cinética que, de ordinario, se requiere para desencadenar una reacción. Algunos grupos de investigación persiguen hoy día este objetivo.

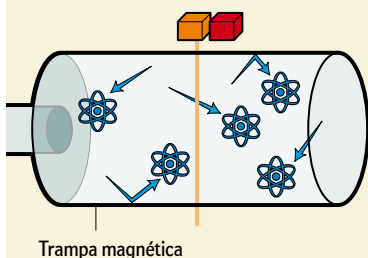
Otra gran ventaja del enfriamiento con un solo fotón reside en que puede aplicarse sobre el hidrógeno y sus isótopos (el deuterio, con un neutrón adicional en el núcleo, y el tritio, con dos neutrones). A finales de los años noventa, Dan Kleppner y Thomas J. Greytak, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, lograron la difícilísima tarea de atrapar y enfriar hidrógeno con métodos criogénicos y enfriamiento evaporativo, pero fracasaron

con el deuterio y el tritio. Avances posteriores se basaron en el empleo de un aparato, relativamente sencillo, concebido para enfriar isótopos. Pero el enfriamiento con fotones individuales se adapta a la perfección a los tres isótopos del hidrógeno. Uno de los objetivos consistirá en mejorar los límites de la espectroscopía de precisión ultrafina, otra aplicación de suma importancia.

Atrapar y enfriar tritio quizá permita medir la masa de los neutrinos, las partículas elementales conocidas más abundantes del universo, y comprender mejor los efectos gravitatorios de dichas partículas en la evolución del cosmos. Dado que se trata de un isótopo radiactivo, el tritio se transmuta en helio-3 cuando uno de sus neutrones se desintegra en un protón, un electrón y un antineutrino. Si se mide la energía del electrón, resulta posible determinar la energía del antineutrino (el cual

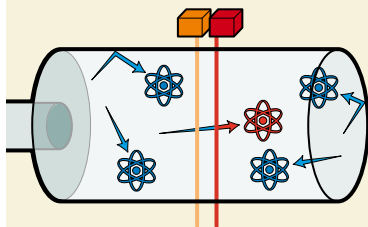
Frío infernal

Después de que un cañón de bobinas atómico u otro dispositivo haya enfriado el gas hasta unas centésimas de grado Kelvin, en la segunda etapa del proceso el gas se enfría hasta la millonésima de grado o menos. La técnica de enfriamiento con fotones individuales lo logra gracias a una puerta de un solo sentido, la cual se inspira en el «demonio de Maxwell», experimento imaginario propuesto por el físico escocés en el siglo XIX. La idea consiste en dejar que la compuerta concentre los átomos en un volumen menor, pero sin elevar su temperatura. Después, al abrir la puerta, el gas se expande de nuevo hacia el volumen inicial y su temperatura desciende aún más.

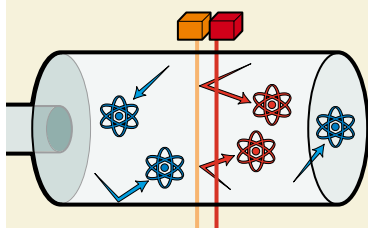


Trampa magnética

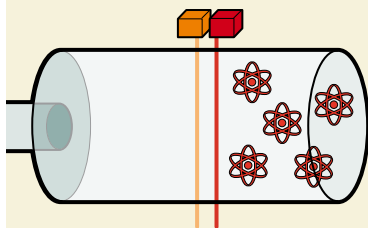
1 Los átomos, todos ellos en cierto estado inicial (azul), se guardan en una trampa magnética. Se enciende entonces un láser (naranja) que afectará solo a los átomos que se encuentren en otro estado.



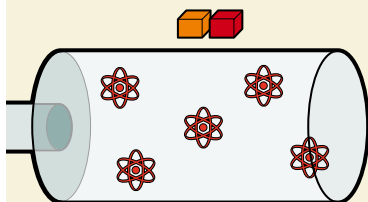
2 Otro láser (rojo) induce transiciones atómicas en los átomos azules hacia un segundo estado estable (átomos rojos).



3 Los átomos en el estado rojo rebotan cuando se encuentran con el láser naranja. Ello los obliga a permanecer en el lado derecho de la trampa.



4 Al final, todos los átomos acabarán por incidir contra el segundo láser, se volverán rojos y quedarán prisioneros en el lado derecho. Se encuentran a la misma temperatura que al principio, pero en un volumen menor.



5 Se permite que los átomos salgan de la trampa hasta que el gas recupere su volumen original. Conforme se expande, el gas se enfría.

atraviesa los detectores sin dejar rastro) y, con ello, su masa. Los físicos teóricos esperan que la masa de los neutrinos coincida con la de los antineutrinos.

Los mismos métodos también servirán para atrapar y enfriar átomos de antihidrógeno, el cual no se había conseguido sintetizar en cantidades significativas hasta hace muy poco, cuando lo logró el CERN, el gran acelerador de partículas cerca de Ginebra. Su manipulación requiere una precaución extrema, puesto que se desintegra en energía tan pronto como entra en contacto con la materia ordinaria. Por esta razón, en este caso ha de generarse primero un haz de antihidrógeno lanzando antiprotones a través de una nube de positrones, frenarlo después y enfriarlo con nuestro demonio de Maxwell. Los experimentos con antihidrógeno ultrafrío podrán responder a esta sencilla cuestión: ¿actúa la gravedad sobre la antimateria de la misma manera que sobre la materia?

Las nuevas técnicas de cañón de bobinas y de enfriamiento con un solo fotón servirán también a importantes aplicaciones prácticas. Los isótopos de la mayoría de los elementos aún se separan mediante un dispositivo llamado calutrón, inventado por Ernest Lawrence para el Proyecto Manhattan. Isótopos diferentes poseen masas ligeramente distintas; un calutrón separa los isótopos gracias a un campo eléctrico, de modo similar a como lo haría un gran espectrómetro de masas. El único proyecto sobre calutrones activo hoy día se encuentra en Rusia, pero no destaca por su eficiencia. Un dispositivo basado en nuestro demonio de Maxwell separaría los isótopos que componen un haz de manera mucho más eficiente que los calutrones. Gracias a este método, se podrían obtener pequeñas cantidades de algunos isótopos, como calcio-48 o iterbio-168, los cuales revisten importancia tanto en medicina como en investigación básica. Por otra parte, la técnica no supone riesgo alguno de proliferación nuclear, ya que solo resulta práctica para obtener cantidades ínfimas de isótopos.

Otra aplicación concierne a la fabricación de dispositivos a escala nanométrica. En lugar de emplearse para frenar átomos, los campos magnéticos podrían utilizarse para focalizar haces atómicos, de la misma manera que una lente concentra la luz en un punto, pero con una resolución de un nanómetro o incluso menor. Después, dichos haces servirían para depositar átomos durante los procesos de nanofabricación y conseguir detalles mucho más finos que los que se obtienen con la litografía óptica, la mejor técnica disponible hoy día para elaborar circuitos integrados. La construcción de estructuras nanométricas mediante la adición de átomos uno a uno —en lugar de las técnicas de pulidos sucesivos, más empleadas en la actualidad— dará lugar a un nuevo campo que, en lugar de nanociencia, podríamos denominar «atomociencia».

El cero absoluto seguirá tan inalcanzable como siempre. Pero aún hay mucho por descubrir —y por ganar— en el camino que lleva hasta él.

PARA SABER MÁS

Espectroscopía de gases sobreenfriados. Donald H. Levy en *Investigación y Ciencia*, págs. 58-67, abril de 1984.

Demonios, motores y la segunda ley. Charles H. Bennett en *Investigación y Ciencia*, págs. 60-68, enero de 1988.

Trampa de láser para partículas neutras. Steven Chu en *Investigación y Ciencia*, págs. 54-61, abril de 1992.

One-photon atomic cooling with an optical Maxwell demon valve. A. Ruschhaupt, J. G. Muga y M. G. Raizen en *Journal of Physics B*, vol. 39, n.º 18, pág. 3833, septiembre de 2006.