

Átomos ultrafríos, ciencia candente

Javier Cruz*

Las situaciones extremas son irresistibles para la física: escalas atómicas, grandes energías, temperaturas ínfimas. En la carrera por acercarse al cero absoluto de temperatura, el francés Claude Cohen-Tannoudji y los estadounidenses Steven Chu y William Phillips han hecho teoría y experimentos de calidad tal que acabaron por compartir el Nobel

Los trabajos que la Academia Sueca de Ciencias decidió premiar con el Nobel de Física 1997 podrían presentar serios problemas a los guionistas de Warner Bros., si el Coyote llega a entender los detalles. Por una vez, la legendaria “marca ACME” le daría un aparato capaz de atrapar al Correcaminos, no importa cuán rápidamente quiera salir corriendo, ni con cuánta sorna emita “bip-bips” supersónicos.

Aunque la Academia Sueca (KVA, por Kungl. Vetenskapsakademien), menos infantil, no reconoce este beneficio potencial en particular, sí comienza su comunicado oficial respecto del premio hablando de la imposibilidad práctica de estudiar objetos cuyo movimiento incesante ronda los 4 mil kilómetros por hora, rapidez promedio con que zumban los átomos en estado gaseoso a temperatura ambiente. Y, considerando que la física moderna nació del vientre atomístico de la materia, el impedimento no es nimio.

¿Cómo frenar a los átomos? Puesto que la temperatura es la manifestación macroscópica de la agitación térmica —es decir, velocidad algo desordenada— de la materia, la respuesta es simple: enfriarlos. Pero esta simplicidad enmascara su lado impráctico: los átomos de gas tienden a condensarse en estado líquido apenas baja su temperatura, y terminan por apretujarse en formas sólidas en que se encuentran tan íntimamente acoplados unos con otros que hay que renunciar al propósito original de estudiar un átomo aislado en

condiciones mínimas de observabilidad.

Además, incluso a la inclemente temperatura de $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$, el átomo continúa moviéndose a 400 km/h, más o menos, rapidez impropia para la observación. No hace bip-bip, mas cómo frustra.

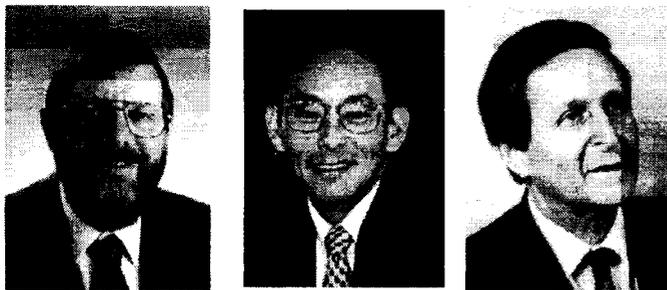
Como para desmentir a quienes aún ignoran que la física no tiene por qué ser menos entretenida que las caricaturas, los estadounidenses Steven Chu y William Phillips, y el francés Claude Cohen-Tannoudji, han inventado métodos para enfriar átomos a temperaturas tan insólitas como una millonésima de un grado Kelvin —el cero de esta escala, $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ corresponde a la inmovilidad total— empleando luz de láser, y atraparlos, además, con trampas magnéticas.

Lo que calienta, enfría

La luminosa idea de detener átomos con rayos de luz tiene antecedentes conceptuales en la sugerencia de Kepler, en el siglo XVII, de que si los cometas siempre apuntan su cauda en dirección opuesta al Sol debe ser por el empuje de la luz solar. Los descreídos argumentaron, por 300 años, que la luz no es corpórea, hasta que a principios de este siglo Louis de Broglie postuló la dualidad de la materia —que se manifiesta como partículas unas veces, y otras como ondas—, y cierto Albert Einstein mostró que la absorción y emisión de fotones —partículas de luz—, por parte de un átomo, cambia su cantidad de movimiento.

Un documento del Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) de Francia, que describe el trabajo de Cohen-Tannoudji, explica que “el enfriamiento de átomos por láser consiste en intercambiar cantidad de movimiento entre los fotones de la luz láser y los átomos, ganando los fotones la cantidad de movimiento que los átomos pierden”.

¿Cómo puede enfriarse algo con luz, si la experiencia dice que la iluminación calienta los objetos? La clave está en el fenómeno por el cual el átomo —una partícula— entra en colisión con el fotón —otra partícula, aunque carente de masa—, y absorbe su energía. La absorción ocurre sólo con luz del color adecuado, y por cierto que no por consideraciones estéticas sino cuánticas. En escalas atómicas, la energía es intercambiada sólo en múltiplos enteros de una unidad



William Phillips, Steven Chu y Claude Cohen-Tannoudji

* Nuevamente, el periódico *Reforma* nos ha autorizado la inclusión en esta revista de la reseña del Premio Nobel de Física, que apareció el día 23 de octubre de 1997, en su página 2C.

básica —el cuanto de Planck—, y cada átomo tiene un conjunto de valores que está dispuesto a absorber, dependiendo de su estructura interna. Si se le ofrece menos energía, la ignora; si más, toma la cantidad justa y devuelve el resto, cual máquina expendedora de refrescos.

Puesto que la energía de los fotones es proporcional a su frecuencia —es decir, su color—, sólo aquellos que están “entonados” con la frecuencia característica del átomo serán absorbidos por éste, en un fenómeno conocido como resonancia. Con este principio, el soviético Letokhov y el estadounidense Ashkin propusieron, en los años 70, desacelerar átomos con rayos láser alineados uno frente a otro. Cada átomo resiente la absorción de fotones como una colisión frontal, y pierde velocidad (figura 1).

“Un átomo interpuesto en un haz de láser resonante no cesa de absorber y reemitir fotones”, informa CNRS. “El proceso es muy rápido y se produce con gran frecuencia: cientos de millones de veces por segundo”. Es el Coyote deteniendo al insufrible pajarraco a golpes de calabazas hervidas. “Todo pasa como si el átomo se desplazara en un medio viscoso que lo frenase tanto más cuanto más rápidamente vaya. A tal sistema se le ha llamado ‘melaza óptica’”.

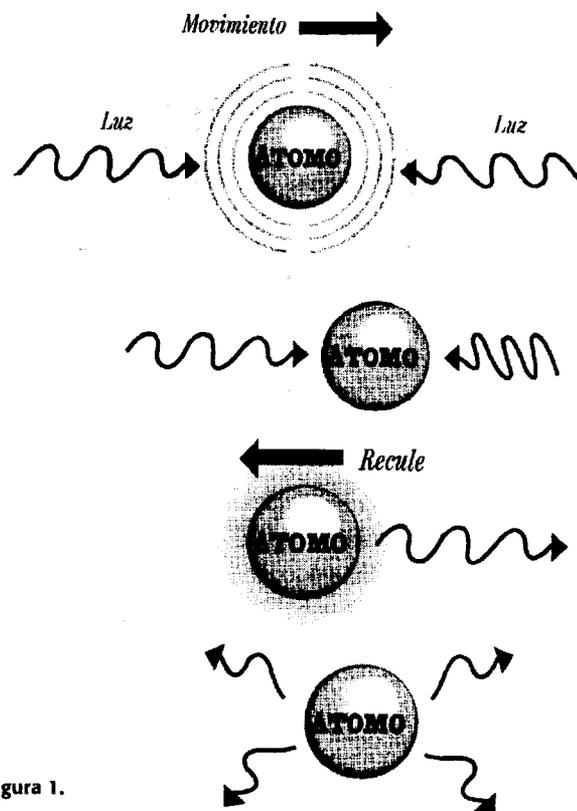


Figura 1.

Física para quedarse helado

El primer equipo en llevar a la práctica estas ideas fue el de Steven Chu. Enfriaron unos 100 mil átomos de sodio a una temperatura de 0.2 μK , dos diezmilésimas del cero absoluto, mediante la técnica de enfriamiento Doppler, así llamada porque depende del efecto Doppler, según el cual un observador en movimiento relativo respecto de una fuente de ondas —sonoras, luminosas, o de otro tipo— las percibe con mayor frecuencia si su movimiento es hacia la fuente, y menor si se aleja de ésta. El efecto es familiar a quienes hayan notado que la sirena de una ambulancia suena más aguda si ésta se acerca a uno, y más grave al alejarse.

Los átomos son colocados entre haces de láser opuestos dos a dos, de modo tal que los átomos siempre se encuentran moviéndose hacia un láser y alejándose del otro. El efecto Doppler dicta que verán la luz del primero corrida hacia el azul —mayor frecuencia—, por lo cual los láseres son preparados con una frecuencia ligeramente menor que la de resonancia. Cada átomo absorbe sólo los fotones que le parecen resonantes, reculando en consecuencia.

Pero hay un límite. “Un átomo no puede ser completamente inmovilizado por este proceso”, advierte el CNRS. “La teoría prevé que la velocidad media de los átomos, y por tanto su temperatura, no puede disminuir por debajo de algunas diezmilésimas de grado Kelvin”, que coincide con la temperatura alcanzada por Chu.

Hay, además, otro problema. “Este movimiento residual

de los átomos los conduce, después de un tiempo, a salir de la región de la melaza óptica”, afectados por la gravedad. No basta con enfriarlos: hay que atraparlos también, e intentar hacerlo con un contenedor material los calentaría. El remedio, sugerido por J. Dalibard, colega de Cohen-Tannoudji, combina la acción óptica de los láseres con una trampa magnética generada por un par de bobinas. “La trampa ‘magneto-óptica’ consiste en superponer a la melaza óptica un campo magnético inhomogéneo”, según CNRS. “Las variaciones energéticas resultantes se traducen en una fuerza global que regresa los átomos al centro de la melaza”. La trampa fue desarrollada en 1987 por Pritchard, del MIT, y el propio Chu.

Demasiada buena suerte

Entretanto, Phillips se ocupaba de calcular, con precisión progresiva, las temperaturas alcanzadas en las nubes atómicas enfriadas. “Motivado por pequeñas diferencias entre teoría y experimento, notadas también por Chu, (Phillips) descubrió, a principios de 1988, que los átomos tenían una temperatura de unos 40 micro Kelvin, K, muy por debajo del límite Doppler predicho en 240 K”, describe el informe de la Academia Sueca. Un K es la millonésima parte de un grado Kelvin.

El propio Phillips se refiere al momento con jovialidad, en un artículo de 1990 para *Physics Today*, en coautoría con Cohen-Tannoudji: “Tales desavenencias fueron difíciles de

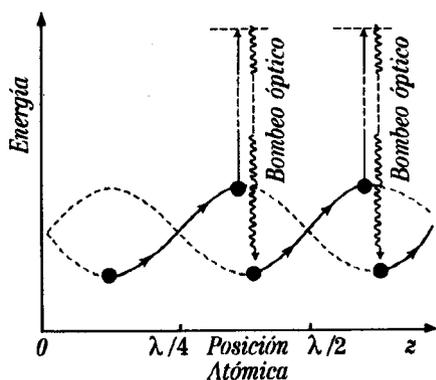
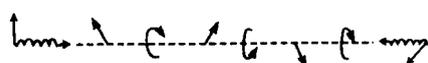


Figura 2.



crear al principio, especialmente considerando la atractiva simplicidad de la teoría de enfriamiento Doppler (y la creencia general de que los experimentos jamás marchan mejor de lo que uno espera)".

Con situaciones así sueña todo físico teórico: una observación experimental fuera de control, clamando por una interpretación nueva por necesidad. Ésta corrió a cargo de Cohen-Tannoudji, muy poco tiempo después. Más próximo a la cultura clásica que a la televisión infantil, el físico francés echó mano de la mitología griega para explicar el fenómeno por analogía con el mito de Sísifo, rey de Corinto, condenado a pasar la eternidad rodando una roca colina arriba, sólo para verla descender apenas alcanzada la cima.

Cohen-Tannoudji comprendió que el fenómeno involucra nuevos mecanismos de enfriamiento cuando cayó en la cuenta de que la teoría anterior sobresimplificó el modelo del átomo en lo tocante a sus niveles de energía. "Los átomos alcalinos no son simples sistemas de dos niveles", escribió en *Physics Today*. "Tienen varios subniveles en el estado basal (...) que abren la puerta a fenómenos físicos tan importantes como el bombeo óptico, que transfiere átomos de un subnivel a otro".

El latín del CNRS es algo más digerible: "Se producen interferencias entre las ondas de láser. El átomo en movimiento ve una serie de colinas y valles de (energía) potencial. Cuando sube una colina, pierde velocidad. Pero el bombeo óptico lo hace pasar de un subnivel del estado fundamental a otro, lo que le cambia el paisaje. Apenas alcanza la cima de una colina de potencial, es colocado bruscamente, por bombeo óptico, en el fondo de un valle. De ahí, debe subir otra colina (y, en consecuencia, perder más velocidad) para recaer en un valle, y así sucesivamente".

Como Sísifo, el átomo no hace más que practicar el montañismo más fútil, dilapidando energía cinética, y, por ende, temperatura (figura 2). "Luego de un gran número de repeticiones, la velocidad del átomo es tan pequeña que ya

no es capaz de subir. Queda inmóvil (o casi) en el fondo de los valles de potencial. Uno obtiene, así, un arreglo de átomos dispuestos regularmente en el espacio, análogamente a un cristal".

Explicada la posibilidad de rebasar el límite Doppler, todo era cosa de hacerlo sistemáticamente, y empujar más allá. En 1989, durante una visita de Phillips al laboratorio de Cohen-Tannoudji en París, mostraron que los átomos de cesio podían ser enfriados hasta $2.5 \mu\text{K}$.

Ni los ven, ni los oyen

En el último tramo de la carrera, Cohen-Tannoudji inventó un nuevo y mejor método de enfriamiento atómico. La Academia Sueca lo explica así: "Incluso los átomos más lentos son forzados a absorber y emitir fotones continuamente", lo cual impone un límite natural como consecuencia del recule que inevitablemente sigue a cada emisión. ¿Sería posible evitar que los átomos más fríos absorbieran más fotones?

La respuesta, afirmativa, era conocida desde los años 70. "Un mecanismo mediante el cual un átomo estacionario puede ser llevado a un estado 'oscuro' en el cual no absorbe fotones ya era conocido, pero la dificultad era combinarlo con el enfriamiento por láser".

Cohen-Tannoudji lo hizo, entre 1988 y 1995, con un dispositivo experimental capaz de seleccionar los átomos menos veloces, y conducirlos al estado oscuro. "Demostraron, entre 1988 y 1995, que el método funciona en una, dos y tres dimensiones. Con seis haces de láser, alcanzaron un estado en el que la distribución de velocidades corresponde a una temperatura de $0.18 \mu\text{K}$ ", continúa el documento de la KVA. "Bajo estas condiciones, átomos de helio reptan a una velocidad de sólo idos centímetros por segundo!"

Suficiente para que hasta el Coyote vea una.

Aplicaciones

Dos consecuencias de la aplicación de estas técnicas de enfriamiento son ya realidades: la creación de un estado de la materia —el Condensado de Bose Einstein— profetizado desde los años 20 (*Reforma*, 20/07/95), y la invención de un láser de átomos rudimentario (*Reforma*, 06/02/97).

Pero acaso el área de aplicación potencial más espectacular sea la relojería de precisión neurótica. De acuerdo con los expertos de CNRS, "la unidad de tiempo, el segundo, está definida actualmente a partir de la frecuencia de la transición atómica entre dos subniveles del estado fundamental del átomo de cesio. El empleo de átomos ultrafríos permite tiempos de observación 100 veces superiores a los obtenibles con los mejores relojes actuales, lo que los hace potencialmente 100 veces más precisos".