

Cómo enfriar y capturar átomos: los premios Nobel de Física en 1997.

Premios Nobel



Física

Abraham Medina Ovando* y Máximo Agüero Granados**

"La imaginación e intuición ayudan al pensamiento a realizar grandiosas conquistas."

Louis de Broglie
Premio Nobel de Física

Introducción

Actualmente, el Premio Nobel representa para la mayoría de los científicos quizá el mejor reconocimiento a su trabajo. Aunque por el momento no es nuestro interés destacar cuál es la importancia relativa de cada área del conocimiento y cuál de ellas debe ser más reconocida en términos de su relevancia, en este breve ensayo comentaremos acerca del trabajo realizado por los científicos galardonados con el Premio Nobel en Física en 1997. Ellos fueron los profesores Steven Chu, de la Universidad de Stanford, Estados Unidos; Claude Cohen-Tanoudji, del Colegio de Francia y la Escuela Normal Superior de París, Francia; y William D. Phillips, del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología, Estados Unidos (NIST por sus siglas en inglés), quienes recibieron el premio por el desarrollo de métodos para enfriar y atrapar átomos con rayo láser. Las investigaciones merecedoras de este premio representan uno de los más claros ejemplos de cómo los límites entre la ciencia y la tecnología se hacen cada vez más difusos y cómo la aplicación del láser influye cada vez más en nuestra vida cotidiana. Con la finalidad de comprender a un nivel muy elemental la naturaleza y alcances de los fenómenos de enfriamiento y atrapamiento atómico, en este artículo nos referiremos a los aspectos básicos y, posteriormente, a algunas de sus implicaciones en la ciencia y en la técnica modernas.

I. Un poco de antecedentes

Es importante mencionar que este resultado excepcional no es un evento fortuito ni solamente fruto del trabajo de unos cuantos investigadores. Es el resultado de un gran esfuerzo internacional. Aquí habría que recordar la frase celebre de Newton, quien aseveraba que él vio más que otros por que estaba sobre los hombros de gigantes. Esto es sumamente cierto. Veamos el porqué. En 1975, Hansch Theodor y Arthur Schawlow, ambos de la universidad de Stanford, propusieron un método para enfriar átomos mediante tres pares ortogonales de rayos láser que se propagaban en sentidos contrarios por pares. Como se verá más adelante, el truco consistía en calibrar el láser a una frecuencia por debajo de la resonancia. En el mismo año David Wineland y Hans Dehmelt propusieron un método similar para enfriar iones. Pero atrapar átomos aún era un reto hasta que los físicos soviéticos Vladilen Letokhov, Vladimir G. Minogin y B. D. Pavlik, del Instituto de Espectroscopía de Moscú, expusieron en 1976 los planteamientos básicos de un método conocido como el gorgojo (*chirping*) de frecuencia, que consiste en barrer la frecuencia del

*Agradezco a G. Jaime su valiosa ayuda en la búsqueda de información para la elaboración de este trabajo, así como el apoyo parcial del Conacyt a través del proyecto 405P-E9506.

Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, 76130, Querétaro, Qro. Teléfono: (42) 20 63 65, Ext. 211. Correo electrónico: amedina@nti.ciencias.unam.mx

**Agradezco a la UAEM por el apoyo parcial bajo el proyecto 1196/96. Facultad de Ciencias, UAEM. Correo electrónico: mag@coatepec.uaemex.mx





láser a partir de una que esté por debajo de la resonancia con la finalidad de atenuar a los átomos rápidos y luego aumentar la frecuencia para decelerar progresivamente a los átomos lentos al mismo tiempo que el haz atómico se enfría. Este método sufrió ciertas variaciones como la propuesta por Phillips y Harold Metcalf de la National Bureau of Standards, Colorado, que consistía en que en lugar de cambiar la frecuencia del láser se cambiara la de resonancia de los átomos al aplicar un campo magnético externo axial a lo largo del haz atómico.

En 1985, Phillips, Metcalf, A. Migdall, J. Prodan y T. Bergeman lograron detener el movimiento de los átomos y contenerlos en una trampa magnética. Los átomos que inicialmente tenían una velocidad de alrededor de 1,000 m/s, terminaban atrapados con una velocidad de 10 m/s.

Cuando Cohen-Tanoudji y Phillips asignaron el término "Enfriamiento de Sisifo" para referirse al fenómeno de pérdida de energía cinética gracias al llamado mecanismo de enfriamiento subdopleriano, ya existían trabajos teóricos anteriores a este redescubrimiento, tal es el caso de los cálculos teóricos hechos por el físico ruso A. P. Kazantzev. El fenómeno consiste en que al estar en movimiento el átomo debe de escalar barreras potenciales al pasar de un estado base en los subniveles de Zeeman a otro que conforman los mínimos del potencial. Por supuesto, al llegar a la cima de una de las "lomitas" el átomo tiene una gran probabilidad de llegar al otro estado base debido al bombeo óptico. En otras palabras, es la combinación de modulaciones espaciales correlacionadas de los desplazamientos de los niveles de energía debido a la luz, de dos estados base en los subniveles de Zeeman y del bombeo óptico entre estos niveles. Esto conduce a que el átomo pierda energía cinética.

II. Enfriamiento atómico

El trabajo reciente en el campo de enfriamiento y atrapamiento con luz lá-

ser ha significado, a nivel fundamental, un gran avance en la física cuántica y ha llevado a una más profunda comprensión de la interacción entre la luz y la materia. Sin embargo, estos estudios tienen su base en investigaciones previas realizadas, inclusive, desde el siglo XVII. En efecto, en 1619 Johannes Kepler sugirió una explicación del porqué las colas de los cometas en nuestro sistema solar apuntan siempre contrarias al Sol. Kepler propuso que la luz podía tener un efecto mecánico sobre los gases que componen las colas de los cometas. Los estudios posteriores del padre del electromagnetismo moderno, James Clerk Maxwell en 1873, y de Albert Einstein en 1917, fueron fundamentales para explicar, en forma definitiva, que parte de esto se debe a la llamada presión de luz o presión de radiación. En particular, Einstein mostró, al hacer uso de la mecánica cuántica, que la absorción y la emisión de fotones por átomos modifica el momento lineal de éstos y que mediante un adecuado proceso de interacción luz-materia es posible afectar también la dirección de su movimiento. Esta situación puede ser ejemplificada de otra manera; imagínese que una pelota que se mueve en cierta dirección y con cierta velocidad es rociada de frente por una corriente de espray, la cual -aunque en sí misma es muy débil- en una sucesión de chorros puede llegar a frenarla. Este ejemplo es excelente para ejemplificar la absorción y emisión de fotones por átomos, pues las gotas del chorro de espray pueden quedar adheridas a la pelota e incluso pueden ser rebotadas.

Ahora podemos explicar por qué la temperatura de los átomos disminuye mediante el choque contra el haz de luz láser. En general, el concepto de temperatura está asociado al estado de movimiento de la materia. Así, desde el punto de vista de la física clásica, la temperatura de una corriente de partículas (que en realidad pueden ser átomos o moléculas) es proporcional a la energía cinética traslacional, es decir:



$E = (3/2)RT = (1/2)mU^2 = p^2/2m$, en donde E es la energía térmica; R es la constante de los gases; T es la temperatura; m es la masa de las partículas; U es la velocidad promedio de la corriente y p el momento lineal promedio. Para una sola molécula o átomo $e = (3/2)kT$, en donde e es la energía térmica correspondiente a una sola partícula; k es una constante universal llamada de Boltzmann y, al igual que antes, T es la temperatura. Entonces es fácil ver que entre más lento sea el movimiento de la corriente o de una sola partícula, más baja será la temperatura. En el caso de la interacción luz-materia tenemos que recordar las leyes de la mecánica cuántica; en primer lugar, que el momento lineal de cada fotón es $p = h\nu/c$, donde h es la constante de Planck; ν es la frecuencia a la cual es emitida la luz y c es la velocidad de la luz en el vacío. Por tanto, cuando ocurre el choque de un fotón con un átomo habrá una pérdida de momento lineal de parte del átomo en una cantidad igual a $p = h\nu/c$. Ahora consideremos específicamente lo que ocurre cuando un átomo de masa m , velocidad v y frecuencia de excitación (frecuencia de emisión o absorción) ν_0 es iluminado por un rayo láser con frecuencia ν_L . Si la frecuencia del rayo láser satisface la condición $\nu_0 = \nu_L (1 + v/c)$, el átomo absorberá un fotón. Esta absorción provocará que el átomo pierda momento lineal (por una cantidad igual a $p = h\nu_L/c$) y por tanto su velocidad disminuirá. Este fenómeno es conocido en la física cuántica como corrimiento Doppler, porque la frecuencia de excitación del átomo depende de la frecuencia de la luz láser y de la velocidad con la que se mueve el átomo. Finalmente, después de muchos ciclos de absorción y emisión, la velocidad del átomo será casi cero. El proceso de emisión no juega un papel importante pues la dirección de emisión espontánea ocurre en todas direcciones y por tanto no contribuye al movimiento neto. El método anterior ha sido utilizado para conseguir experimentalmente temperaturas atómicas mucho más frías que las al-

canzadas en las profundidades del espacio interestelar, es decir, sólo unos cuantos millonésimos o milmillonésimos de grado arriba del cero absoluto.

Es importante destacar que la parte experimental de este modelo fue realizada, principalmente y de manera independiente, por los grupos de Chu y de Phillips, quienes tuvieron que sortear complejos problemas técnicos (es obvio que alinear un rayo láser con una corriente de átomos no es una tarea fácil). La contribución de Cohen-Tanoudji consistió principalmente en la solución y validación teórica de los experimentos tanto de enfriamiento como de atrapamiento. A partir de estos cálculos es posible probar, por ejemplo, que en un gas de átomos ideales de dos niveles se puede calcular la temperatura límite, el llamado límite Doppler, que para la transición de resonancia en sodio puede alcanzar 0.24 mK (milésimas de Kelvin).

III. Atrapamiento atómico

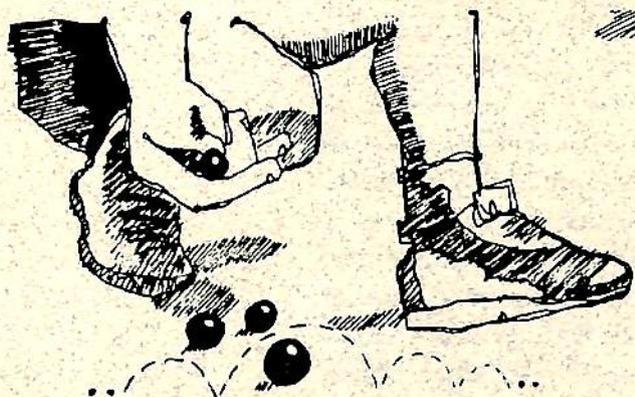
Después de diversas propuestas teóricas, los físicos experimentales también lograron atrapar átomos en una red óptica construida mediante el choque de rayos láser provenientes de diferentes direcciones. Esto es posible debido a que los láser que se interceptan en una cierta región crean, debido a su estructura, un patrón de interferencia periódico, lo que genera una red o patrón de regiones brillantes y oscuras entre las cuales los átomos casi sin movimiento quedan atrapados. La energía de corrimiento de los átomos es menor en las regiones brillantes, por lo que los átomos capturados en tal arreglo de patrones láser deberán desplazarse hacia las regiones brillantes conforme son más lentos. Una analogía casi exacta de esta situación física se observa en la forma en que los huevos (átomos) se ajustan perfectamente a los cartones en los que se venden en los supermercados (redes ópticas). En particular, uno de los más recientes logros del grupo de William Phillips es la demostración de que una red óptica puede





difractar luz láser del mismo modo que los cristales difractan rayos X. Este efecto es llamado dispersión de Bragg, y ello ha permitido que los científicos puedan observar cambios en el movimiento de los átomos atrapados cuando éstos se enfrían en una red óptica.

El atrapamiento de átomos permitiría su perfecta localización, es decir, su exacta ubicación espacial. Sin embargo, debido al principio de incertidumbre de Heisenberg, una de las más sólidas leyes de la mecánica cuántica, esta localización no es posible pues, de acuerdo con la relación $\Delta x \Delta p \geq h$, donde Δx es la incertidumbre en la posición; Δp es la incertidumbre en el momento lineal y h la constante de Planck, si se lograra una perfecta localización de los átomos ($\Delta x = 0$), para que el producto $\Delta x \Delta p$ sea finito, Δp tendría que ser muy grande. Esto implicaría que la energía cinética del átomo también sería grande y lo mismo la temperatura. Por tanto, el atrapamiento atómico tiene un fuerte compromiso con el enfriamiento. Todavía más, si ocurriera una perfecta localización de los átomos se tendría la estructura correspondiente a un sólido cristalino; sin embargo, debido a la incertidumbre en la ubicación de los átomos lo que se logra es un estado condensado especial extremadamente frío, pero no es un sólido sino un gas, llamado el condensado de Bose-Einstein, en honor al físico indú S. Bose y de Albert Einstein, quienes predijeron la existencia de tales sistemas. Investigaciones muy recientes han reportado la primera observación experimental de la condensación de Bose-Einstein en un gas atómico diluido y el desarrollo del primer láser atómico rudimentario.



IV. Aplicaciones

El trabajo sobre enfriamiento y atrapamiento atómico ha generado una intensa actividad mundial entre los científicos dedicados a la óptica física, y en particular ha abierto nuevas rutas en el estudio del comportamiento cuántico de los vapores atómicos diluidos a muy bajas temperaturas. Las técnicas de enfriamiento y atrapamiento láser son usadas ahora en espectroscopía de alta resolución (caracterización fina de elementos y compuestos) y en el estudio de colisiones ultra frías. Estas técnicas también han encontrado aplicación en los relojes atómicos, interferómetros y rayos láser atómicos, y en el desarrollo de instrumentos para la medicina (como pinzas ópticas que pueden manipular células vivas y otros objetos pequeños) y la litografía atómica.

Otro tipo de experimentos que usan átomos fríos en colisiones tiene que ver con lo siguiente. Los científicos saben que dos átomos neutros llegan a atraerse uno al otro debido a los corrimientos esporádicos de sus orbitales electrónicos; no obstante, la magnitud de esta fuerza de atracción es también influida por la distancia entre los átomos y el tiempo que toma al campo de fuerza para moverse entre ellos. El efecto de la velocidad finita de la luz puede observarse en los campos de energía de los dos átomos. Así se ha podido colisionar átomos de sodio fríos mientras incide un rayo láser sobre ellos. El resultado es un estado molecular débilmente acotado que no existe en la naturaleza, muchas veces mayor que la molécula ordinaria y que sólo existe en el laboratorio por rigurosamente 10 nanosegundos (diez milmillonésimas de segundo). Al medir los niveles de energía de estas inusuales moléculas de sodio se tiene un más aceptable modo de medir el tiempo de vida de sus átomos. Datos experimentales de este tipo se espera que sean una guía para las aplicaciones a gran escala desde fenómenos astrofísicos hasta la industria de la iluminación. ☞

