

# Búsqueda y conquista de la condensación Bose-Einstein

## El Premio Nobel de física

En 1924, el físico S. N. Bose, de la Universidad de Dacca, en la India, envió a Einstein un artículo en el que la ley de distribución de Planck para los fotones era derivada completamente con argumentos estadísticos.

Carmen Varea Gilabert

El año pasado fue concedido el Premio Nobel de física a Ketterle, Wieman y Cornell por el estudio de la llamada condensación de Bose-Einstein en gases de átomos alcalinos. La historia es la siguiente:

A principios del siglo XX, la naturaleza de la radiación térmica era motivo de gran interés científico. La chispa que desató esa atención fue el estudio de Max Planck sobre dicha radiación; en él dio a conocer que la distribución espectral de la luz que sale de un cuerpo térmico sólo se puede explicar si los emisores de energía ocurren en estados discretos de energía. Esto llevó a Albert Einstein a concluir, en 1905, que la misma radiación era generada y convertida en paquetes de energía; éstos son los cuantos de radiación o fotones.

La visión de estos paquetes de energía viajando por el espacio sugirió a Einstein varias consecuencias físicas, entre las que se encuentra la emisión de electrones por superficies metálicas iluminadas y cuyo estudio teórico lleva a la descripción del efecto fotoe-

léctrico. Por este trabajo Einstein ganó el Premio Nobel en 1921.

Casi al mismo tiempo, en 1924, el físico S. N. Bose, de la Universidad de Dacca, en la India, envió a Einstein un artículo en el que la ley de distribución de Planck para los fotones era derivada completamente con argumentos estadísticos, sin recurrir a los resultados de

la electrodinámica clásica. Einstein se dio cuenta de la importancia del artículo y lo tradujo al alemán. Inmediatamente se puso a trabajar en el problema, y entre 1924 y 1925 desarrolló una visión completa de la teoría de partículas bosónicas; esto es, nació el concepto de partículas que obedecen la estadística de Bose-Einstein, que hoy sabemos es la que describe los sistemas de muchas partículas idénticas con espín entero.

Einstein se dio cuenta de que si el número de partículas se conserva, aun si las partículas no interactúan entre sí, éstas experimentarán una transición de fase a temperaturas suficientemente bajas. A esta condensación se le llama condensación de Bose-Einstein. Bose no encontró este comportamiento porque él estaba estudiando fotones que, al no tener masa, no necesitan condensarse porque pueden desaparecer cuando la energía del sistema disminuye.

La condensación que Einstein encontró proviene del hecho de que, en el límite de un volumen infinito de tres dimensiones, el número total de estados en

energías muy bajas es extremadamente pequeño. Entonces no hay espacio para todas las partículas cuando la temperatura decrece, y el sistema sólo puede acumular todas las partículas superfluas en su estado de energía más baja. En el límite termodinámico, cuando el volumen y el número de partículas tienden a infinito, el sistema entra en un nuevo estado que por mucho tiempo fue imposible detectar en un laboratorio.

Muy pronto se había encontrado que la fase líquida del isótopo del helio  $^4\text{He}$  presentaba el extraordinario comportamiento conocido como superfluidez. Esto fue observado por H. Kamerlingh Onnes, quien en 1913 había recibido el Premio Nobel. Finalmente, en 1938, F. London sugirió que la superfluidez podía ser una manifestación de la condensación de Bose de los átomos de helio. Esta observación se confirma si se observa que no existe un efecto similar en el isótopo  $^3\text{He}$ , que tiene un comportamiento estadístico de Fermi-Dirac. Sin embargo, las fuertes interacciones en helio líquido han impedido, hasta la fecha, predecir todas sus propiedades en forma *ab-initio* (partiendo de primeros principios). En 1941, L. D. Landau explicó mediante una teoría fenomenológica la habilidad del helio líquido de fluir sin resistencia, y en 1962 le fue otorgado el Premio Nobel por este trabajo.

Un fenómeno relacionado con el del flujo sin fricción de un superfluido es el flujo sin resistencia de una corriente en ciertos metales a temperaturas suficientemente bajas. Esto fue descubierto también por H. Kamerlingh Onnes en 1911, pero no fue explicado completamente sino hasta 50 años después. J. Bardeen, L. N. Cooper y J. R. Schrieffer derivaron en 1957 una teoría microscópica basada en interacciones entre los electrones mediada por las oscilaciones de la malla de átomos. Esto les valió el Premio Nobel de física en 1972.

V. L. Ginsburg y L. D. Landau ya habían sugerido una teoría fenomenológica en 1950, pero las aplicaciones útiles de este enfoque fueron apareciendo lentamente. La teoría microscópica mostraba que la superconductividad está basada en que los electrones de espín opuesto adquieren fuertes correlaciones y en que provocan un estado altamente coherente e insensible a las perturbaciones, y de ahí la falta de resistencia. Los electrones obedecen la estadística de Fermi-Di-



En un condensado de Bose-Einstein los átomos de un elemento adquieren una energía uniforme, tal como ocurre con las ondas luminosas que forman un rayo láser.

rac, pero pares de ellos se pueden considerar como partículas bosónicas, y la superconductividad es un fenómeno similar a la condensación de Bose-Einstein. Un efecto similar ocurre en el isótopo fermiónico del helio  $^3\text{He}$ , que sufre una transición de fase a 3 milikelvins. Al igual que los electrones, los átomos de  $^3\text{He}$  se aparean formando entidades bosónicas, que entran en estado condensado. Esta fase fue observada por primera vez por D. M. Lee, D. D. Osheroff y R. Richardson en 1972, y su descubrimiento los hizo merecedores del Premio Nobel en 1996. La estructura de este condensado es muy complicada: el fluido presenta una amplia variedad de fases y multitud de fenómenos.

Todos estos fenómenos asociados a la condensación Bose-Einstein no representan sistemas descritos por la teoría original de Einstein, y muy pronto se reconoció que sería de gran interés lograr la condensación Bose-Einstein en un sistema diluido de partículas. Las condiciones necesarias son, sin embargo, muy extremas. Para que los átomos se “sientan” unos a otros, sus funciones de onda deben ser suficientemente extendidas y tener un traslape considerable. El tamaño mínimo de una función de onda está dado por la

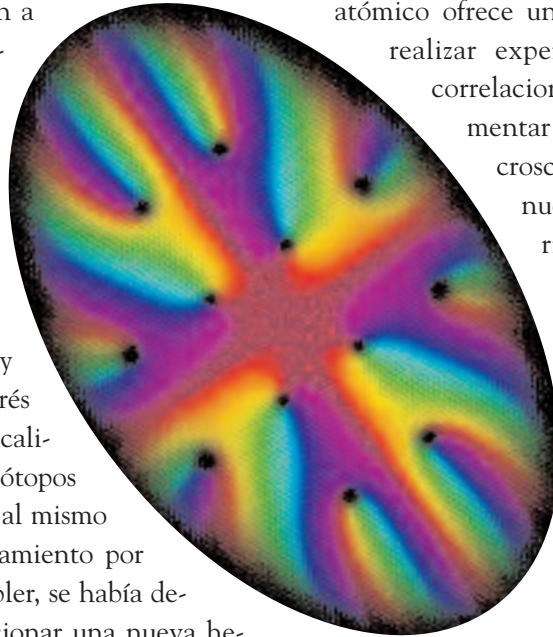
longitud de onda térmica de De Broglie, que tiene que ser más grande que la separación entre los átomos para que la estadística cuántica de las partículas tenga efecto. Esto requiere muy bajas energías (es decir, muy bajas temperaturas) y una densidad grande de partículas. La mayoría de los átomos forman moléculas o se condensan formando un líquido en estas circunstancias. El reto es mantener la densidad atómica deseada conservando el gas atómico intacto.

Muchas pruebas se llevaron a cabo sin éxito usando hidrógeno, lo cual dejó frustrada a la comunidad científica. Sin embargo, en estos intentos se demostró que métodos como el enfriamiento por evaporación y las trampas magnéticas eran útiles para alcanzar bajas temperaturas y densidades aceptables. El interés se volvió hacia los átomos alcalinos, que presentan muchos isótopos con carácter bosónico, ya que al mismo tiempo la tecnología de enfriamiento por láser, basada en el efecto Doppler, se había desarrollado al grado de proporcionar una nueva herramienta experimental aplicable a estos átomos. Siguiendo estas ideas, C. E. Wieman, en Boulder, empezó un programa de investigación para crear el condensado de Bose-Einstein. La idea de Wieman era la de enfriar con láser los átomos dentro de una trampa magneto-óptica, transferirlos a una trampa puramente magnética y continuar el proceso usando enfriamiento por evaporación hasta alcanzar las temperaturas necesarias. Para ello contrató a E. A. Cornell, y ambos continuaron el trabajo por dos rutas, usando átomos de rubidio. El éxito vino en junio de 1995. Antes de ello, ya se había analizado ampliamente cuál sería la señal segura de la presencia de la condensación, así que cuando se observó una nube de condensación en el centro de la muestra no hubo ninguna duda. Sin embargo, Cornell y Wieman continuaron el trabajo de investigar las propiedades del sistema condensado.

Muchas de las ideas usadas para lograr la condensación de Bose-Einstein las habían desarrollado original-

mente en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) los grupos de D. Kleppner y D. E. Pritchard. Alrededor de 1990, W. Ketterle se unió a este esfuerzo y se convirtió en el principal investigador en el programa para alcanzar la condensación de Bose-Einstein en el MIT. Él escogió trabajar con átomos de sodio, y tuvo éxito sólo unos meses después que el grupo de Boulder.

La función de onda coherente de un sistema atómico ofrece un medio único y novedoso para realizar experimentos. Su comportamiento correlacionado se puede utilizar para aumentar efectos cuánticos en escalas macroscópicas. Así se pueden investigar nuevos fenómenos, que no se derivan directamente del condensado pero que son aumentados cuando ocurren en este medio único. Se esperan varias aplicaciones en muchas áreas de investigación, cuando el uso de la condensación de Bose-Einstein atómica se convierta en una herramienta estándar en los laboratorios experimentales.



Función de onda de un condensado Bose-Einstein. Cortesía de D. L. Feder (Electron and Optical Physics Division, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, EUA).

Existen ya sugerencias para aumentar la exactitud de las mediciones de alta precisión, y aplicaciones en procesamiento de información cuántica.

También existen posibles aplicaciones técnicas, como el uso de bosones en litografía.

---

**Carmen Varea Gilabert**, doctora en física, tiene como especialidad la física estadística, tema en el que realiza investigaciones y del cual ha publicado numerosos trabajos en revistas internacionales. En 1996 recibió el Premio de la Investigación Científica de la Sociedad Mexicana de Física. Actualmente se desempeña como investigadora en el Instituto de Física de la UNAM.