

Condensado de Bose-Einstein: El Quinto Estado de la Materia

Introducción

En los sistemas cuánticos, como las partículas subatómicas (electrones, protones, neutrones, fotones, etc.) existe una propiedad intrínseca llamada espín. Es una especie de momento angular cuántico, pero mientras que en la física clásica el momento angular se asocia con una rotación, el espín es una propiedad intrínseca, que no se puede relacionar de forma directa con una rotación y no tiene equivalente clásico.

El espín está cuantizado, es decir, solo puede tomar unos valores fijos: $\frac{n}{2}$, siendo n un número entero. De esta forma, el espín puede tomar valores enteros (0, 1, 2...) o semienteros (1/2, 3/2, 5/2...). Por ejemplo, electrones, protones y neutrones tienen espín 1/2, así como los quarks que forman protones y neutrones. Estas partículas son las llamadas fermiones. Por otra parte, los fotones tienen espín 1, y el famoso bosón de Higgs tiene espín 0. Son los llamados bosones.

Llamamos “estado” a la forma matemática que tenemos de describir un sistema cuántico: cómo se comporta, dónde puede estar, cómo se mueve, qué energía tiene, qué espín posee... Dos bosones pueden coincidir en el mismo estado cuántico ya que se rigen por la llamada estadística de Bose-Einstein. En cambio, esto está absolutamente prohibido para los fermiones, sujetos a la estadística de Fermi y al inquebrantable principio de exclusión de Pauli.

Un poco de historia

En nuestro día a día conocemos principalmente tres estados de la materia: sólido, líquido y gaseoso. En ciertas condiciones también podemos encontrar el estado de plasma, similar a un gas pero con sus partículas eléctricamente cargadas. Pero existe un quinto estado de la materia, mucho menos común, llamado Condensado de Bose-Einstein (BEC, por sus siglas en inglés). Este estado fue predicho teóricamente por Satyendra Nath Bose y Albert Einstein en 1924-1925.

Bose fue un físico indio que, en 1924, mientras trabajaba en la Universidad de Dhaka (en la actual Bangladés), escribió un artículo derivando la ley de radiación cuántica de Planck sin emplear ninguna referencia a la física clásica, siendo el germen de la mecánica estadística cuántica. Al no ser aceptado inicialmente para su publicación, mandó su artículo directamente a Albert Einstein, quien lo tradujo al alemán y lo publicó en la revista alemana Zeitschrift für Physik, dando origen a la estadística de Bose-Einstein. Un año después, en 1925, Einstein generalizó la estadística desarrollada por Bose a las partículas, lo que llevó a la predicción de la existencia de los condensados de Bose-Einstein.

¿Qué es un Condensado de Bose-Einstein?

Al enfriar un gas, los estados energéticos en los que se pueden encontrar sus partículas se van reduciendo, viéndose obligadas a ocupar estados de menor energía. Si las partículas son bosones, a temperaturas suficientemente bajas (cerca del cero absoluto, -273.15 °C), puede ocurrir que todas las partículas acaben ocupando el estado fundamental, volviéndose indistinguibles unas de otras. Si esto ocurre, las partículas “pierden su individualidad” y pasan a comportarse como una sola entidad cuántica, pudiendo describirse todo el sistema mediante un único estado en lugar de tener que emplear el estado de cada partícula. Esto es lo que se conoce como condensado de Bose-Einstein.

NOTA: La escala Kelvin mide la temperatura partiendo del **cero absoluto (0 K = -273,15 °C)**, el punto en que las partículas prácticamente dejan de moverse.

Cada kelvin tiene el **mismo tamaño** que un grado Celsius; simplemente está desplazada. Así, cuando decimos que el Helio se hace líquido a “4.2 K”, es lo mismo decir “4.2 °C sobre el cero absoluto”.

Es como si tuviéramos una habitación llena de pelotas de tenis, todas moviéndose aleatoriamente en todas direcciones y a todas las velocidades posibles. Al reducir la temperatura y alcanzar el condensado de Bose-Einstein, todas las pelotas comenzarían a moverse al unísono, haciendo siempre lo mismo al mismo tiempo, como si se tratase de una única pelota gigante.

Otros fenómenos cuánticos similares al condensado de Bose-Einstein son la superconductividad o la luz láser. Un láser es una fuente de luz especial: todos los fotones que emite tienen la misma energía, dirección y fase. Esto es posible porque los fotones (bosones) pueden compartir estado cuántico.

Demostración experimental

En junio de 1995, los físicos Eric Cornell y Carl Wieman consiguieron enfriar un gas de aproximadamente 2000 átomos de rubidio-87 a una temperatura muy muy cercana al cero absoluto (inferior a 170 nK), creando el primer condensado de Bose-Einstein. Para enfriar los átomos a semejante temperatura emplearon técnicas de enfriamiento mediante láser y mediante evaporación. Cuatro meses después, Wolfgang Ketterle consiguió condensar átomos de sodio-23. Estos descubrimientos les valieron a los tres el premio Nobel de física en 2001.

El enfriamiento mediante láser consiste en disparar a los átomos con luz láser de frecuencia ligeramente menor a la de una transición electrónica de los átomos. Debido al efecto Doppler, por el cual la frecuencia de la luz que ven los átomos depende de su velocidad respecto a la fuente del láser, únicamente los átomos que se muevan hacia esta fuente absorben fotones. Estos fotones producen la excitación del átomo, que a continuación se desexcita emitiendo otro fotón y perdiendo velocidad. Esta pérdida de velocidad, y por lo tanto de energía cinética, es equivalente a su enfriamiento.

Para reducir aún más la temperatura, se empleó posteriormente el enfriamiento mediante evaporación de los átomos más calientes. Esta técnica consiste en encerrar los átomos en una trampa magnética y dejar que los átomos más calientes, los que presentan una mayor velocidad, escapen de ella. De esta forma se reduce la velocidad media de los átomos del sistema, lo que conlleva el enfriamiento del gas.

¿Y esto para qué sirve?

Aunque su creación es muy compleja, los BEC tienen algunas aplicaciones que hacen que su dominio sea interesante. Por un lado, se podrían crear láseres de átomos, ahora mismo en fase experimental. Estos láseres, de forma similar a los láseres de luz, consisten en un haz de átomos coherentes (con la misma fase) que se comportan como una onda y serían útiles para hacer holografía con átomos en lugar de luz, obteniendo imágenes holográficas de mayor resolución.

Por otro lado, los BEC se pueden emplear para fabricar relojes atómicos más precisos que los existentes. Los relojes atómicos normalmente emplean una transición concreta de átomos de cesio, con una frecuencia bien conocida. Cuando los átomos de cesio realizan la transición 9192631770 veces, ha pasado un segundo. Esta medida del tiempo lleva asociada una incertidumbre que se reduce bastante en caso de emplear un BEC en dos estados distintos, mejorando la precisión y estabilidad del reloj.

Otro ejemplo de uso de los BEC lo podemos encontrar en la computación cuántica. En este campo se emplean sistemas cuánticos para almacenar y procesar información. Estos sistemas son típicamente microscópicos, lo que los hace muy sensibles a perturbaciones en su entorno. El uso de un BEC, que se puede describir mediante un único estado macroscópico en lugar de microscópico y por lo tanto menos sensible a perturbaciones, para almacenar información, es una vía de desarrollo de ordenadores cuánticos que superen el potencial de los ordenadores clásicos más potentes hasta la fecha.