

Condensado de Bose-Einstein.

Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias.
Física atómica y materia condensada.
Zavalza Arellano Bianca Saraim. (biancaclassical@ciencias.unam.mx)

Resumen.

El condensado de Bose-Einstein es una propiedad que se presenta en ciertos materiales, fue descrita teóricamente por Bose y Einstein en 1924 y demostrada experimentalmente en 1995 por Erick Cornell y Carl Wieman. Se caracteriza principalmente porque a bajas temperaturas cercanas al cero absoluto, las partículas que conforman el material pasan al estado fundamental (el nivel de mínima energía), dicho fenómeno solo ocurre para bosones debido a que no obedecen el Principio de exclusión de Pauli.

Condensado de Bose-Einstein.

Contexto histórico.

En 1924 el físico hindú Satyendra Nath Bose, envió un artículo a Albert Einstein, donde planteaba la idea de tratar los fotones como un gas de partículas idénticas mediante la derivada de la ecuación de Planck para la radiación de un cuerpo negro, (bases teóricas para la estadística de Bose-Einstein y la teoría del condensado de Bose-Einstein). Más adelante Einstein mediante el trabajo de Bose y suponiendo la conservación del número de partículas, generaliza su teoría para un gas ideal con átomos o moléculas idénticas, además predice que para bajas temperaturas, cercanas al cero absoluto, las partículas se reúnen en el estado cuántico más bajo del sistema; a este fenómeno se le llamó el condensado de Bose-Einstein (BEC), exclusivo para los bosones, pues los fermiones obedecen el principio de exclusión de Pauli, que indica que dos o más fermiones no pueden estar en el mismo estado cuántico. [1]

En esa década comprobar estas predicciones resultó un problema, debido a la insuficiencia tecnológica para enfriar una muestra de átomos a temperaturas muy bajas, sin embargo, décadas más tarde, científicos como Harold Hess y Letokhov sugieren el uso de trampas magnéticas para enfriar los átomos, mediante el enfriamiento evaporativo y décadas después a principios de los años ochenta un grupo de científicos conformado por Steven Chu y Ashkin idean un sistema de enfriamiento de átomos mediante haces de rayos láser, que se hacían incidir, de manera que los impactos

de los fotones **ralentizaban** los átomos [2]. Combinando estos sistemas de enfriamiento en 1995, Erick Cornell y Carl Wieman (científicos de la Universidad de Colorado en Boulder) logran obtener evidencia del condensado de Bose Einstein en un gas atómico diluido; su trabajo experimental consistió en enfriar átomos de rubidio-87 a una temperatura de 70 nk, logrando así que los átomos formarían un condensado y perdieran su identidad individual (partículas indistinguibles) por más de 15 segundos; este logro importante para la física permitió que en 2001 recibieran el premio Nobel, junto con Wolfgang Ketterle quien análogamente realizó el experimento usando átomos de sodio. [1]

Análisis teórico.

Los bosones son partículas elementales cuyo momento angular intrínseco (espín) es entero y por el Teorema de la estadística del espín, se afirma que los bosones no cumplen el principio de exclusión de Pauli, su función de onda cuántica es simétrica respecto al intercambio de partículas y obedecen la estadística de Bose-Einstein.

El fenómeno BEC, se presenta entonces solo en los bosones, cuando su energía cinética es mínima, es decir cuando hay densidades de partículas ultrabajas y temperaturas bajas, **esto como consecuencia** de que el potencial químico del sistema $\mu = TK_B \ln(Z)$ sea equivalente a la energía mínima; con $Z = 1$, esto último solo se cumple si $n\lambda^3 \leq \zeta\left(\frac{3}{2}\right)$, donde.

$$n\lambda^3 = \zeta\left(\frac{3}{2}\right) \quad \text{Ec.1}$$

Corresponde al valor crítico del sistema. Con n la densidad de partículas, λ la longitud de onda de De Broglie y $\zeta(Z)$ la función Z de Riemann.

Entonces a partir de la ecuación 1 se define la temperatura crítica T_c (temperatura a partir de la cual ocurre el condensado, cuando se llega a esta temperatura el nivel fundamental del átomo comienza a llenarse macroscópicamente, es decir los bosones comienzan a condensarse o caer al nivel de menor

energía posible y dado que la longitud de onda es grande las partículas se comportarán como una función de onda global, es decir los átomos serán idénticos y por tanto se tendrá un estado de coherencia cuántico.

La temperatura crítica del sistema (formada por partículas que no interactúan entre sí), está definida como.

$$T_c = \left(\frac{n}{\zeta\left(\frac{3}{2}\right)} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{2\pi\hbar^2}{mK_B} \quad \text{Ec.2}$$

Con K_B = constante de Boltzmann, $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ y m la masa de las partículas.

En la figura 1 se observa la relación entre la temperatura y la densidad de partículas.

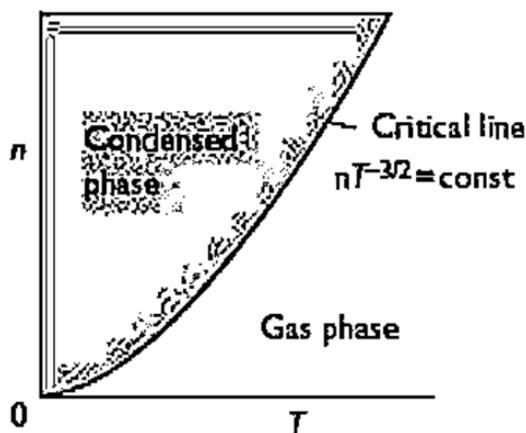


Figura 1. Diagrama de fase del condensado de Bose-Einstein en el plano de densidad-Temperatura.[3]

Por otra parte el número de partículas (bosones) en el estado fundamental está dado por $n_0 = N - \frac{V}{\lambda^3} \zeta\left(\frac{3}{2}\right)$, que en términos de la temperatura crítica está definido como.

$$n_0 = N \left(1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^{\frac{3}{2}} \right) \quad \text{Ec.3}$$

Donde T es la temperatura de los N bosones. [3]

Propiedades.

Algunas de las propiedades como consecuencia de las bajas temperaturas en la formación del BEC son que debido a que la velocidad de las partículas es baja, la interacción entre estas es débil, además habrá formación de melaza óptica y bajo un potencial inducido se generarán vórtices. [3]

Experimento del Condensado de Bose-Einstein.

Como se ha hablado previamente, para demostrar la existencia del BEC, es necesario del uso de dos métodos, el enfriamiento por láser y el enfriamiento evaporativo.

El enfriamiento por láser de un átomo, consiste en la detención de los átomos, reduciendo su energía cinética, su funcionamiento se basa en la presión o fuerza resultante del impacto de los fotones sobre éste (haces de luz que inciden sobre los átomos), además considera un ajuste adecuado tomando en cuenta la frecuencia a la que absorben los átomos los fotones y el efecto Doppler. Sin embargo, a pesar de que la técnica de enfriamiento por láser logra bajas temperaturas no son del orden de escala para lograr tener el condensado, por tanto, se emplea la segunda técnica, el enfriamiento evaporativo, el cual permitirá lograr tener temperaturas del orden de nK , **este método se basa en trampas magnéticas**, generadas por el potencial de campos magnéticos intensos. [4]

Conclusiones.

El condensado de Bose-Einstein es un fenómeno cuántico, que ocurre para ciertos materiales a bajas temperaturas, es una propiedad de los bosones y trae como consecuencia diferentes propiedades que han permitido el desarrollo tecnológico, sus aplicaciones van desde la construcción de láseres de alta precisión, la detección del campo gravitatorio hasta simulaciones cosmológicas a pequeñas escalas. Su importancia ha permitido el desarrollo de investigaciones que permite comprender la teoría cuántica.

Referencias.

- [1] M.H Anderson; (1995), J.R Ensher Observation of Bose-Einstein condensation in a dilute atomic vapor, *Science*, 269, 198-201.
- [2] Bose Einstein Condensate. http://mural.uv.es/ferhue/1o/Condensados_Bose-Einstein_FHG.pdf Consultado el día 3/04/2018.
- [3] Huang Kerson, Introduction to statistical physics, Taylor y Francis, USA, 2002, 298 páginas
- [4] Bose Einstein Condensation theory. <https://archive.is/20071024134547/http://www.physicstoday.org/pdf/vol-54/iss-12/p14.html#selection-621.1-621.400> Consultado el día 5/04/2018.