

Condensado de Bose-Einstein.

Hugo Agustín García González

Condensados de Bose-Einstein (CBE).

En clase se vio que en la naturaleza se encuentra que hay una relación directa entre el espín de las partículas que forman un sistema y las propiedades de simetría de la función de onda ante el intercambio de las partículas idénticas. Las funciones de onda de sistemas de partículas con espín entero son simétricas ante el intercambio y a estas partículas se les conoce como bosones (fotones, piones, gluones y mesones). Por otra parte, partículas con espín semi-entero, como los electrones, los protones y los neutrones, tienen funciones de onda antisimétricas y se les conoce como fermiones. Algunas partículas se comportan como bosones **sin serlo estrictamente**, en el caso de átomos, es necesario que el espín total resultante del acoplamiento de todos los fermiones sea entero mostrando los átomos estados de simetría en lugar de antisimetría.

Los fermiones se rigen por principio de exclusión de Pauli, el cual dice que dos fermiones no pueden ocupar simultáneamente el mismo estado cuántico. Por otro lado los bosones no se rigen por el principio de Pauli y dos partículas pueden compartir el mismo estado cuántico. Bajo este hecho preparando átomos bosónicos con determinadas condiciones, se podría confinarlos en un mismo punto y estado de energía, "formando un mismo átomo", donde todas sus partículas comparten mismo estado cuántico y exhiben mismo comportamiento. Éstos átomos forman un estado de agregación de la materia conocido como condensado de Bose-Einstein (CBE).

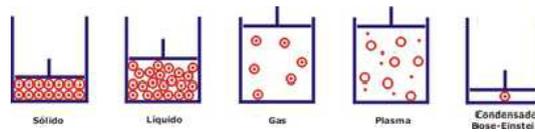


Figura 1. Representación de la distribución de las partículas en los distintos estados de agregación de la materia.

Los CBE se dan a temperaturas menores a la temperatura crítica (T_c), a estas temperaturas el potencial químico μ equivale a la energía mínima del sistema, pasando los bosones a este nivel de mínima energía. Para un gas formado por partículas que no interactúan entre sí, la temperatura crítica se da por:

$$T_c = \left(\frac{n}{\zeta(3/2)} \right)^{2/3} \frac{h^2}{2\pi m k_B} \quad (1)$$

Donde n es la densidad del gas, m la masa de los bosones, h la constante de Planck, k_B la constante de Boltzmann y ζ la función zeta de Riemann ¹. La ecuación 1, es proporcional a la densidad del gas y la masa de sus átomos esto es crucial a la hora de elegir el gas por condensar.

¹ $\zeta = \sum_{m=1}^{\infty} m^{-3/2}$ [1].

El número de bosones en el estado fundamental N_0 , lo podemos obtener mediante la ecuación:

$$N_0 = N \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^{3/2} \right] \quad (2)$$

Con T la temperatura de los N bosones.

A temperaturas cada vez más bajas el carácter ondulatorio de las partículas sobresale y conviene pensar a las partículas en términos del paquete de ondas asociado a ellas. A medida que se enfría, el tamaño del paquete aumenta entrecruzándose con la onda asociada a la partícula contigua, la velocidad tenderá a cero y los paquetes de los distintos átomos se fundirán, siguiendo el sistema una función de onda global. En este punto no hay forma de diferenciar a los átomos uno de otro, se dice que el sistema está en un *estado de coherencia cuántico macroscópico*.

Aspectos experimentales.

Para obtener el BEC es necesario utilizar una serie de técnicas experimentales.

a) Trampa Magneto-óptica (MOT). Esta técnica se discutió en clase y consiste en combinar melazas ópticas [5] con las propiedades de los campos magnéticos. MOT consta de tres pares de láseres contrapropagándose y circularmente polarizados, en cuya intersección están los átomos por enfriar. También cuenta con dos bobinas sobre las que sus respectivas corrientes circulan en direcciones opuestas (bobinas tipo anti-Helmoltz). El campo magnético resultante (B) forma un cuádrupolo esférico, B se anula en el centro de la trampa y aumenta su intensidad conforme se aleja del centro, formándose un gradiente de campo. Los átomos cerca del centro de la trampa interactúan con el campo magnético cuadrupolar y por efecto Zeemann se desdoblan sus niveles energéticos respecto al momento angular de cada nivel. Esto aumenta la probabilidad de absorber fotones de los láseres que al estar polarizados circularmente, llevan un momento angular ($-\hbar$ o \hbar), favoreciendo el enfriamiento Doppler.

El gradiente de polarización da origen a otro tipo de enfriamiento, llamado *enfriamiento sísifo*, que hace que la energía de los átomos dependa de su posición dentro del MOT, de modo que cuando el átomo avanza a través del MOT, cambia su energía cinética a potencial que después se emite como fotón. Mediante MOT se contienen y enfrían átomos a temperaturas del orden de $10\mu\text{K}$, pero aún no son lo suficientemente fríos como para llegar al CBE.

b)Enfriamiento evaporativo. Apagando los láseres del MOT y generando un campo similar al del MOT pero más intenso se crea una trampa magnética convencional, que se anula en el centro y aumenta en puntos alejados del centro. La forma de este campo se muestra en la parte izquierda de la figura 2. Éste campo empuja hacia el centro los átomos con espín paralelo, mientras que átomos con espín opuesto se repelen del centro. El interior del cono de la figura 2, representa el potencial magnético que contiene a los átomos, y al anularse el campo en el centro el espín atómico cambia al azar, provocando que varios átomos inviertan su espín y sean expulsados de la trampa. Para no tener esta pérdida descontrolada de átomos Eric Cornell añade otro campo magnético que rota en un plano normal al eje de simetría de la trampa inicial resultando un potencial en forma de paraboloides, como el mostrado en el lado derecho de la figura 2. Al hacer girar el punto central del campo original los átomos siguen atrapados en la llamada .órbita de muerte se puede llevar a cabo el enfriamiento evaporativo.²

²Este tipo de potencial giratorio es conocido como potencial tiempo-órbita (TOP), por su siglas en inglés.

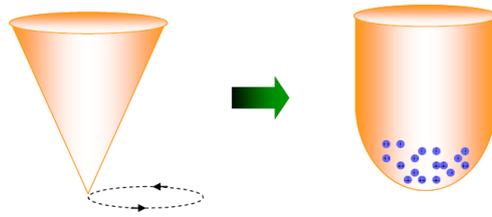


Figura 1. Esquema de la formación de una TOP.

Teniendo contenidos los átomos en una "taza" (dentro del paraboloide), mediante una fuente de ondas (conocida como escarpelo) que inicialmente posee la frecuencia para cambiar el espín de los átomos más energéticos (los ubicados en las regiones donde el campo magnético es máximo), se extraen los átomos más energéticos sin reducir de manera drástica la densidad del gas (para este momento es del orden de $10^{10}1/cm^3$)

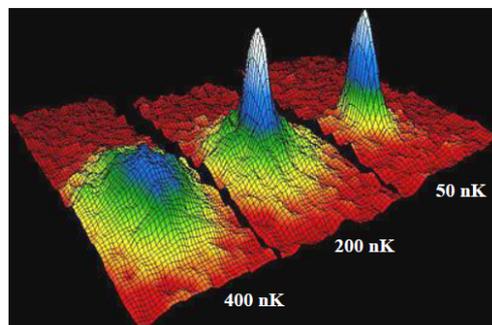


Figura 3³. Esquema tridimensional de una nube de gas donde vemos de la formación del BEC (Cortesía de Nobel e-Museum, <http://www.nobel.se/physicslaureates/2001/phyadv.pdf>).

La figura 3, muestra un grupo de fotografías para distintos valores del escarpelo, en las diferentes imágenes se ve un patrón circular de átomos normales de rubidio (amarillo y verde) distribuidos de manera uniforme, como los gases en equilibrio termodinámico. En la parte central de la primer gráfica (de izquierda a derecha) se observan regiones donde los átomos comienzan a condensarse (región azul). En las restantes gráficas la región blanca muestra átomos condensados. Experimentalmente a una frecuencia de evaporación $\nu=4.23$ MHz (≈ 170 nK) se inicia la formación del CBE, para frecuencia de 4.1 MHz, casi todos los átomos de la trampa está en estado condensado.

En conclusión; en 1924 Bose y Einstein predicen de manera teórica la existencia del CBE, sin embargo más de medio siglo después en 1995 mediante un gran desarrollo tecnológico se logran enfriar miles de átomos de rubidio a menos de una millonésima de grado sobre el cero absoluto, un hecho más que reconcilia la teoría cuántica con la realidad práctica. Algunas de las aplicaciones del fenómeno del CBE, son para: láser de átomos (para la construcción de nano-estructuras de gran precisión), superfluidez y superconductividad, simulación de fenómenos cosmológicos a pequeña escala para su estudio, detección de la intensidad del campo gravitatorio y relojes atómicos

Referencias

- [1] <http://www.ugr.es/~jtorres/tema11fe.pdf>
- [2] [http://www.sibiup.up.ac.pa/otros-enlaces/tecnociencias/Vol. %209 \(1\)/Tecnociencia %20Articulo %2010 %209\(1\) %2007.pdf](http://www.sibiup.up.ac.pa/otros-enlaces/tecnociencias/Vol.%209(1)/Tecnociencia%20Articulo%2010%209(1)%2007.pdf)

³Esta gráfica es parte de los datos obtenidos por Cornell, Wiemann y su equipo, el 5 de junio de 1995, alrededor de las 10hrs, cuando por vez primera se observó el quinto estado de la materia; el condensado de Bose-Einstein.

- [3] [http://www.sibiup.up.ac.pa/otros-enlaces/tecnociencias/Vol. %209\(1\)/Tecnociencia %20Articulo %2010 %209\(1\) %2007.pdf](http://www.sibiup.up.ac.pa/otros-enlaces/tecnociencias/Vol.%209(1)/Tecnociencia%20Articulo%2010%209(1)%2007.pdf)
- [4] [http://wwwpub.zih.tu-dresden.de/ fhgonz/carrera/1o/ftc/Condensados_Bose-Einstein_FHG.pdf](http://wwwpub.zih.tu-dresden.de/~fhgonz/carrera/1o/ftc/Condensados_Bose-Einstein_FHG.pdf)
- [5] Jiménez, *Notas-FAMC*.
- [6] Ibarra-Durán, A. 2005. *Por debajo del Límite Doppler: El Enfriamiento Sísifo*. *Tecnociencia* 7(1): 121-133.