

EL CONDENSADO DE BOSE-EINSTEIN

Mónica Capilla Alba

Jesús M. Gómez Romero

Física Estadística

Mayo 2010

ÍNDICE

1.- Introducción.....	3
2.- Estados de la materia.....	3
2.1.- Estado sólido	
2.2.- Estado líquido	
2.3.- Estado gaseoso	
2.4.- Estado plasma	
2.5.- Condensado Bose-Einstein	
2.6.- Condensado de Fermi	
2.7.- Supersólido	
3.-Fundamento teórico.....	5
4.- El nobel.....	7
5.- Montaje experimental.....	8
5.1.- Técnicas de enfriamiento	
5.1.1.- Enfriamiento por láser	
5.1.2.- Enfriamiento por evaporación	
6.- Resultados y observaciones.....	12
7.- Aplicaciones.....	13
8.- Bibliografía.....	15

1.- INTRODUCCIÓN

La materia está formada por constituyentes atómicos que presentan ciertas diferencias desde un punto de vista físico.

Todas las partículas elementales son bosones o fermiones, dependiendo de si su espín es entero o semientero. El espín se refiere a una propiedad física de las partículas subatómicas, por la cual toda partícula elemental tiene un momento angular intrínseco de valor fijo. Los nombres de estas partículas rinden homenaje a Enrico Fermi, físico italiano) y Satyendra Bose (físico hindú), quienes cumplieron un rol fundamental en caracterizar sus propiedades.

Ejemplos de fermiones son los electrones, los protones, los neutrinos y alrededor de la mitad de los átomos conocidos. Entre los bosones se encuentran los fotones (partículas de luz), los fonones (partículas asociadas al sonido) y la otra mitad de los átomos conocidos. El comportamiento de fermiones y bosones es radicalmente diferente.

Mientras que los fermiones están obligados a cumplir el principio de exclusión de Pauli: "no puede haber más de una partícula ocupando un mismo estado cuántico", no existe dicha exclusión para los bosones, estos pueden ocupar estados cuánticos idénticos. Propiedad que conlleva al estudio del condensado de Bose – Einstein.

El condensado de Bose-Einstein es el estado de agregación de la materia que se da en ciertos materiales a muy bajas temperaturas. La propiedad que lo caracteriza es que una cantidad macroscópica de las partículas del material pasan al nivel de mínima energía, denominado estado fundamental. El condensado es una propiedad cuántica que no tiene análogo clásico.

2.- ESTADOS DE LA MATERIA

El condensado constituye el quinto estado de la materia.

Para cualquier sustancia o elemento material, modificando sus condiciones de temperatura o presión, pueden obtenerse distintos estados o fases, denominados estados de agregación de la materia, en relación con las fuerzas de unión de las partículas que la constituyen.

La materia se nos presenta en diversos estados de agregación, todos con propiedades y características diferentes, y aunque los más conocidos y observables cotidianamente son cuatro, las llamadas fases sólida, líquida, gaseosa y plasmática, también existen otros estados observables bajo condiciones extremas de presión y temperatura.

2.1.- ESTADO SÓLIDO

A bajas temperaturas, los materiales se presentan como cuerpos de forma y volumen definidos, sus átomos a menudo se entrelazan formando estructuras cristalinas. Son calificados generalmente como duros y resistentes, de modo que poseen la capacidad de soportar fuerzas sin deformación aparente. En ellos las fuerzas de atracción son mayores que las de repulsión.

2.2.-ESTADO LÍQUIDO

Si se incrementa la temperatura el sólido va descomponiéndose hasta desaparecer la estructura cristalina, alcanzando el estado líquido. Se caracteriza por su capacidad de fluir y adaptarse a la forma del recipiente que lo contiene. En este caso, aún existe cierta unión entre los átomos del cuerpo, aunque mucho menos intensa que en los sólidos.

2.3.- ESTADO GASEOSO

Incrementando aún más la temperatura se alcanza el estado gaseoso. Las moléculas del gas se encuentran prácticamente libres, de modo que son capaces de distribuirse por todo el espacio en el cual son contenidos. Se caracterizan por su facilidad de compresión.

2.4.- ESTADO PLASMA

El plasma es un gas ionizado, es decir, los átomos que lo componen se han separado de algunos de sus electrones o de todos ellos. De esta forma el plasma es un estado parecido al gas pero compuesto por electrones y cationes. Se caracteriza por conducir la electricidad y ser fuertemente influidos por los campos magnéticos.

2.5.- CONDENSADO DE BOSE – EINSTEIN

Se alcanza a muy bajas temperaturas, mediante la condensación de miles de átomos. Su característica principal es que las partículas que lo conforman se encuentran en el mismo estado cuántico.

2.6.- CONDENSADO DE FERMI

Es una fase superfluida formada por partículas fermiónicas a temperaturas bajas.

2.7.- SUPERSÓLIDO

Los átomos comienzan a comportarse como si fueran sólidos y fluidos a la vez. Es característica del helio-4, en la que una fracción de los átomos de helio comienza a moverse a través de la película como una sustancia conocida como “super-fluido”, un líquido que se mueve sin ninguna fricción. Una característica del superfluido es que pueden atravesar cualquier objeto sólido o cualquier superficie no porosa, debido a su fuerte capacidad de oscilación.

3.- FUNDAMENTO TEÓRICO

Como ya hemos dicho, el BEC es un estado de agregación de la materia que se presenta en determinadas condiciones. Éstas son principalmente una densidad ultrabaja y una temperatura baja, es decir, una energía cinética mínima.

La razón por la que los condensados sólo se presentan a bajas temperaturas es que el potencial químico μ se hace equivalente a la energía mínima del sistema.

El número medio de partículas en un estado cuántico r , es en el caso de bosones:

$$\langle n_r \rangle = \frac{1}{e^{\beta(\varepsilon_r - \mu)} - 1}$$

donde

$$\beta = \frac{1}{k_B T}$$

Siendo k_B la constante de Boltzmann y T la temperatura. Y ε_r es la energía del estado cuántico r , que para el caso de bosones se corresponde con los niveles de traslación

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{n_x, n_y, n_z} = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2mL^2} (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2)$$

Si el sistema contiene N partículas debe cumplirse:

$$\langle N \rangle = \sum_r \frac{1}{e^{\beta(\varepsilon_r - \mu)} - 1}$$

También puede escribirse como:

$$N = \int_0^\infty d\varepsilon \rho(\varepsilon) \langle n(\varepsilon) \rangle$$
$$N = g \frac{4\pi V}{h^3} (2m^3)^{\frac{1}{2}} \int_0^\infty d\varepsilon \frac{\varepsilon^{\frac{1}{2}}}{e^{\beta(\varepsilon - \mu)} - 1}$$

Supongamos además que el mínimo nivel de energía accesible a una partícula es

$$\varepsilon_r = 0$$

La energía asociada con el movimiento de traslación es la única energía que poseen las partículas de un gas ideal aislado. Cuando consideramos un sistema suficientemente grande, el nivel más bajo de energía tiende a cero.

Esta imposición obliga a que

$$\mu(T) \leq 0$$

De no ser así, entonces habría estados cuya energía sería menor que el potencial químico y resultaría que los números medios de ocupación serían una cantidad negativa lo cual no es posible.

Así que, μ , que como no puede ser positivo, irá aumentando su valor hasta el punto $\mu=0$. La temperatura T_0 a la cual se alcanza este valor vendrá definida por:

$$T_0 = \frac{1}{k_B \beta_0}$$

Conocida como la temperatura de la condensación de Bose-Einstein.

Entonces,

$$N = g \frac{4\pi V}{h^3} (2m^3)^{\frac{1}{2}} \int_0^\infty d\varepsilon \frac{\varepsilon^{\frac{1}{2}}}{e^{\beta_0(\varepsilon_r)} - 1}$$

de donde se obtiene

$$T_0 = \frac{1h^2}{g^{\frac{2}{3}} 2\pi mk} \left(\frac{N}{V \zeta\left(\frac{3}{2}\right)} \right)^{\frac{2}{3}}$$

Conviene separar el cálculo del número total de partículas en dos partes, una que dé cuenta de aquellas cuyo valor de la energía es el propio del estado fundamental, y otro distinta de cero, estados excitados.

$$N = N_0 + N'$$

Donde N_0 representa el número de partículas en el estado fundamental ($\varepsilon_r = 0$) y N' representa el número de partículas en un cierto estado excitado ($\varepsilon_r > 0$). Es decir:

$$N' = g \frac{4\pi V}{h^3} (2m^3)^{\frac{1}{2}} \int_0^\infty d\varepsilon \frac{\varepsilon^{\frac{1}{2}}}{e^{\beta_0(\varepsilon_r - \mu)} - 1}$$

$$N_0 = g \frac{1}{e^{-\beta\mu} - 1}$$

Veamos en función de la temperatura los resultados que podemos obtener.

1.- Consideremos el gas de Bose a una cierta densidad (N/V) y a una cierta temperatura $T \gg T_0$. Ocurre que el número máximo de partículas que pueden existir en estados excitados es mucho mayor que N .

$$\frac{N'}{N} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}}$$

Es de esperar que prácticamente todas las partículas se encuentren en estados excitados y esto ocurre para $\mu \ll 0$.

2.- Si disminuimos la temperatura T hasta $T=T_0$, se hace $N'=N$ y no implica necesariamente que $\mu=0$.

3.- Si seguimos disminuyendo la temperatura ($T<T_0$), el número de partículas en el estado excitado irá disminuyendo y a su vez aumentado las del estado fundamental.

$$N_0 = N \left(1 - \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \right)$$

A estas temperaturas el potencial químico es prácticamente nulo. Cuanto más se disminuye la temperatura, más y más partículas se agrupan en el nivel fundamental.

4.- EL NOBEL

Los tres físicos premiados en el año 2001 lograron por primera vez, crear condensados de Bose-Einstein en 1995. Eric Cornell y Carl Wieman lo lograron cuatro meses antes que Wolfgang Ketterle, pero este obtuvo en su experimento muchos más átomos en el estado condensado, lo cual permitió estudiar mejor sus propiedades fundamentales.

Los tres galardonados forman parte de una misma generación de jóvenes científicos en el campo de la física.

Cornell nació en 1961 y desarrolla su trabajo en el Instituto Nacional de Medidas y Tecnología de Boulder (Colorado) Weiman nació en 1951 e investiga en la Universidad de Colorado, mientras que Ketterle nació en 1957 y trabaja en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), en Cambridge.

Cornell y Wieman trabajan también en el JILA, un instituto de investigación en Boulder, conocido antes como el Instituto Conjunto de Astrofísica en Laboratorio. Ketterle trabajaba de manera independiente en Alemania, antes de incorporarse al MIT en 1990.

La estadística de Bose-Einstein fue introducida para estudiar las propiedades estadísticas de los fotones en 1920 por el Satyendra Nath Bose. Bose estaba estudiando la nueva idea de que la luz venía en pequeños paquetes discretos de energía llamados cuantos o fotones, y supuso ciertas reglas para decidir cuándo dos fotones deberían ser contados como iguales o diferentes y estableció la hoy conocida “Estadística de Bose-Einstein”.

Bose tenía problemas para que la gente le creyera y publicara sus ideas en las revistas científicas de la época, por lo que decidió enviar sus trabajos a Albert Einstein, el cual usó sus influencias para que fueran publicados.

En el momento en que Bose y Einstein predijeron la existencia de dichos condensados, la tecnología disponible no era suficiente para la realización experimental de dicha teoría. La existencia de estos condensados permaneció como una idea teórica, una suposición prácticamente inalcanzable, de forma que el hipotético condensado no era más que una curiosidad sin trascendencia. No obstante, al pasar un tiempo tras la publicación de los artículos, algunos físicos comenzaron a interpretar los resultados (por ejemplo Fritz London en 1938 en cuanto al helio líquido), apreciar su importancia y formular hipótesis sobre ciertos fenómenos cosmológicos que podrían tener su explicación en los condensados de Bose-Einstein (BEC).

Inicialmente, este experimento fue inalcanzable, pero a medida que se iban diseñando nuevas técnicas de enfriamiento, la expectación e inquietud por obtener estos condensados iba creciendo y muchos grupos de investigadores afrontaban este reto con intención de ser los primeros en conseguirlo. Paralelamente a la carrera experimental, en los años cincuenta fueron formuladas teorías generales sobre los condensados atómicos por Gross, Pitaevski, Bogoliubov y Ginzburg-Landau que sirvieron de base para comprender fenómenos como la superfluidez o superconductividad,



Eric Cornell y Carl Wieman



Wolfgang Ketterle

5.-MONTAJE EXPERIMENTAL

Como ya hemos señalado, la condensación de Bose-Einstein se produce a temperaturas cercanas al cero absoluto, un millón de veces inferiores a la temperatura de fondo del universo. Es ésta la razón principal por la que se tardaron setenta años en realizar el experimento, en un laboratorio de Colorado. Hasta entonces se desarrollaron técnicas muy sofisticadas de enfriamiento, surgieron nuevas ideas y se observó el BEC en la superfluidez del ^3He , en superconductores y semiconductores, hasta que finalmente se logró un BEC con un gas. En este apartado se describirán las técnicas utilizadas en dicho experimento en 1995 y los fenómenos en los que se basan.

En principio, el procedimiento para crear un condensado de Bose-Einstein es sencillo: enfriar el gas hasta que los paquetes de onda asociados a los átomos empiecen a solaparse. El primer impedimento reside en el hecho de que, al enfriar por debajo de determinadas temperaturas un sistema gaseoso, éste suele experimentar una transición de fase a líquido y sólido. Para evitar esto, se debe crear un gas sobresaturado. En el caso del hidrógeno se sabe que ofrece resistencia frente a la agrupación átomo a átomo que precede a la congelación. No obstante, los átomos alcalinos como el cesio, sodio, etc. se transforman antes que el hidrógeno en un condensado y con ellos se puede emplear la técnica del enfriamiento láser, puesto que sus transiciones ópticas son excitables mediante láseres convencionales.

Aparte, al ser los átomos mayores que los del hidrógeno, chocan con mayor frecuencia, con lo que se reparten la energía más deprisa de forma que el BEC pueda formarse antes de exista un agrupamiento. Además, tienen una estructura de niveles de energía internos favorable para el proceso de confinamiento en las trampas generadas por los campos magnéticos. En resumen, es necesario diseñar un sistema que retire el calor de dichos átomos y además los aisle de su entorno para que no absorban calor por difusión del ambiente exterior más caliente.

5.1.- TÉCNICAS DE ENFRIAMIENTO

El diseño experimental parte de una pequeña caja de cristal. En el mencionado contenedor se crea un vacío casi perfecto, lo que garantiza el aislamiento del exterior y la posible interacción con otras partículas residuales que pudiese haber en su interior o en sus paredes. En ese punto se introduce una mínima cantidad de gas de rubidio (87Rb) puro.

Posteriormente se procede al enfriamiento de dicho gas mediante dos técnicas: el enfriamiento y aislamiento mediante la luz láser y el enfriamiento por evaporación mediante la trampa magnética.

5.1.1.-ENFRIAMIENTO POR LÁSER

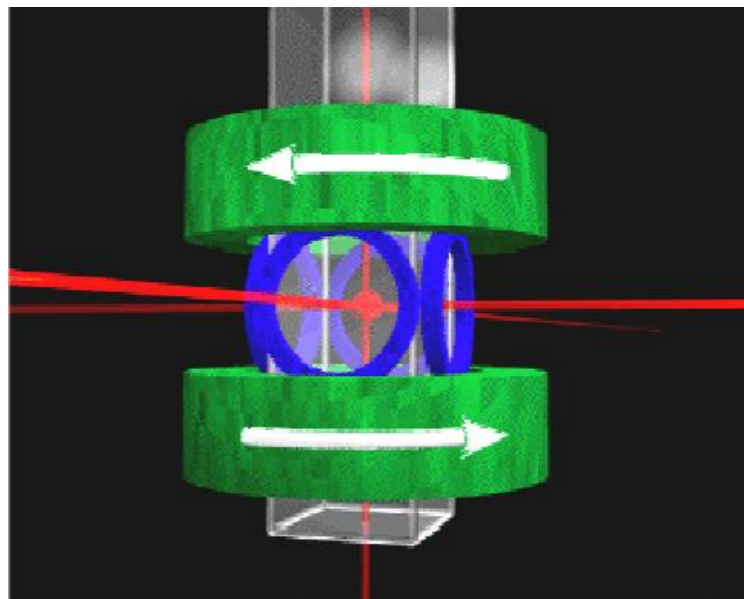
El enfriamiento por láser se basa en el empleo de luz láser para frenar los átomos. Se hace incidir seis haces de láser por cada una de las caras, de forma que converjan en el gas situado en el centro de la celda del cristal y se ajusta la frecuencia de manera que los átomos puedan absorber la radiación emitida y emitan a su vez otros fotones.

Para ello se debe ajustar adecuadamente (y con gran precisión) la frecuencia teniendo en cuenta la frecuencia a la que absorben los átomos los fotones y el efecto Doppler. Por una parte, los átomos “observan” una frecuencia superior en los fotones que se están acercando contra ellos. Asimismo, al haber seis láseres en cada una de las

tres direcciones espaciales convergentes en el gas, los átomos que viajen “contra” un haz se estarán a su vez alejando de otro. De nuevo debido al efecto Doppler, la frecuencia de los fotones que viajan en su misma dirección es menor de la real (emisor) desde el punto de vista de los átomos debido al alejamiento respecto de la fuente. Así pues, sabiendo que los valores de emisión y absorción de radiación son discretos y están bien determinados, se puede ajustar la frecuencia de manera que al acercarse los átomos a un haz láser observen la radiación idónea para absorber los fotones. Automáticamente, los fotones de los que se está alejando tendrán una frecuencia menor desde su punto de vista, y por tanto menor que la adecuada para la absorción, por lo que apenas absorberá los que van en su dirección: los fotones simplemente pasarán a través de él.

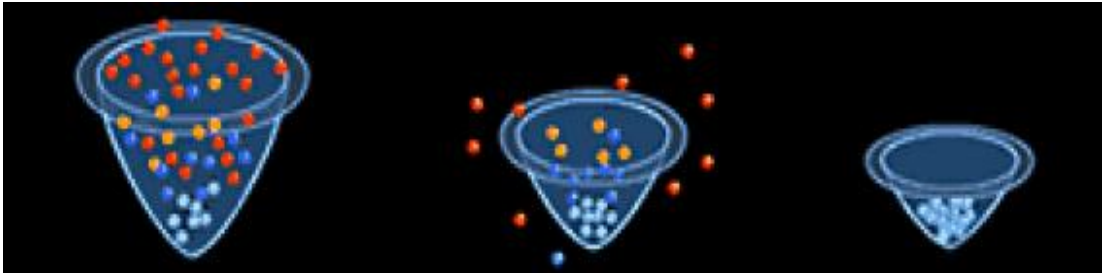
La dispersión (absorción y reemisión) de fotones al alejarse el átomo de un haz provoca una aceleración por la presión de radiación, mientras que si se acerca, la presión de radiación provoca una deceleración, en la misma medida en el átomo y por tanto lo enfría. Tal y como hemos configurado el sistema, un átomo que viaja en el eje de dos haces enfrentados dispersará muchos más los fotones a los que se acerca que de los que se aleja. En consecuencia, globalmente, todos los átomos, vayan en la dirección que sea del espacio, serán frenados paulatinamente, es decir, reducirán su energía cinética y se enfriarán considerablemente.

El enfriamiento por láser tiene un límite. Los aproximadamente 10 millones de átomos de rubidio introducidos en la caja están concentrados en la trampa láser y tienen una temperatura muy pequeña, de $40\mu\text{K}$, que sin embargo es cien veces mayor que la necesaria para formar el condensado. De modo que se necesita de una técnica adicional para seguir enfriando el gas.



5.1.2.- ENFRIAMIENTO POR EVAPORACIÓN

Este método se basa en trampas magnéticas, generadas por el potencial de campos magnéticos muy intensos, aprovechando la polaridad de los átomos. En el caso de las trampas magnéticas, tras apagar los rayos láser que habían enfriado y confinado los átomos, se hace circular corriente por las bobinas. Los campos encierran más a los átomos, aunque permiten que aquéllos con mayor energía escapen del pozo de potencial. Este comportamiento se basa en la polaridad atómica.



Dichos átomos interactúan a causa de su momento dipolar magnético con el campo magnético:

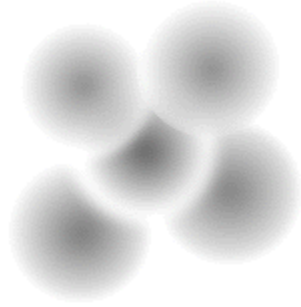
1.- Si el momento dipolar es paralelo al campo, el átomo buscará el mínimo potencial, con lo que caerá al “fondo” de la trampa, donde el potencial y la energía es mínima y, por tanto, el estado es el más estable.

2.- Si el momento es perpendicular a las líneas de campo, el átomo buscará el máximo de potencia y saldrá del pozo confinante.

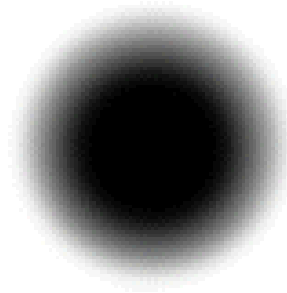
Los átomos se mueven finalmente muy despacio y se aglomeran en el fondo del pozo de potencial, donde se manifiestan las propiedades ondulatorias de dichos átomos.

Los paquetes de onda se van confundiendo y solapando. A un nivel elemental, el proceso final es aquel en el que dos átomos chocan de manera que uno de ellos se queda en un estado casi estacionario, el mínimo permitido por la relación de indeterminación de Heisenberg. Posteriormente se produce una “avalancha” de átomos que se acumulan en el estado más bajo de la trampa, donde se funden y forman el condensado de Bose-Einstein.

Se puede describir como un “superátomo” ya que el sistema puede ser descrito por una única función de onda, exactamente como ocurre en un solo átomo.



Átomos ultrafríos



Átomos en un BEC

Hay que señalar que en este proceso, a medida que desciende la temperatura se reduce también el número de átomos dentro de la trampa, y se reduce a la par la temperatura a la que se produce la transición al condensado de Bose, aunque a menor ritmo que la bajada de temperatura de la trampa, con lo que la temperatura del condensado no es inalcanzable.

En resumen, las técnicas principalmente utilizadas son el enfriamiento por efecto Doppler en trampas láser y el enfriamiento evaporativo en trampas magnéticas.

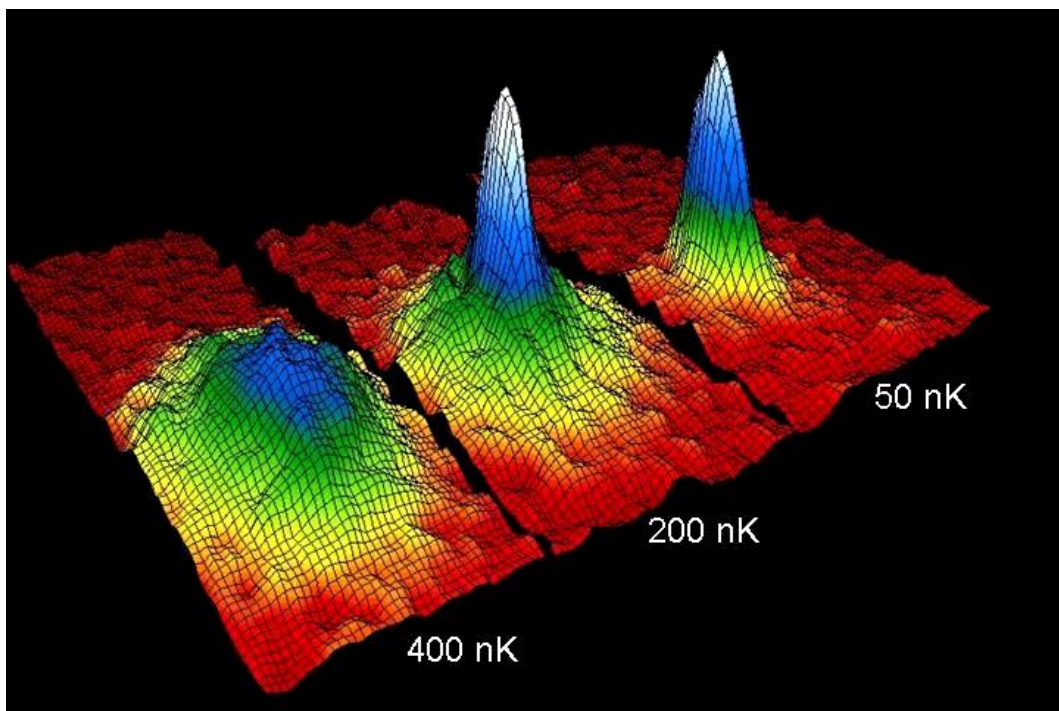
6.- RESULTADOS Y OBSERVACIONES

- En la mayoría de los experimentos, se consigue la condensación de Bose-Einstein entre las temperaturas de 500 nK y $2 \mu\text{K}$.
- Los condensados más grandes son de 30 millones de átomos en sodio, y de mil millones en hidrógeno. Los más pequeños de unos cientos de átomos.
- Dependiendo de la trampa magnética, la forma de los condensados es aproximadamente redonda, con un diámetro entre 10 y $50 \mu\text{m}$; o cilíndrica con un diámetro de unos $15 \mu\text{m}$ y una longitud de $300 \mu\text{m}$.
- El ciclo completo de enfriamiento para obtener un condensado puede durar desde unos pocos segundos hasta varios minutos.
- El condensado tiene una vida media corta, entre diez y veinte segundos en los primeros experimentos con átomos alcalinos; es muy frágil y de muy difícil mantenimiento y observación, aunque cada vez se mejoran las técnicas para ello.

Una vez obtenido el condensado es necesario medir de alguna manera si se ha conseguido alcanzarlo, a qué temperatura, y más allá, estudiar sus propiedades. Los átomos están en la parte más baja del cuenco formando una nube fría y tenue, difícil de observar.

Para “fotografiar” el condensado se emplea una técnica denominada foto de sombras (o experimentos de tiempo de vuelo) mediante un destello de luz láser. Se apagan los campos magnéticos, de forma que los átomos pueden expandirse libremente. Una décima de segundo después, se ilumina la nube recién expandida mediante un láser que es dispersado por los átomos del condensado, gracias a que se sintoniza una frecuencia de láser resonante con una transición atómica. Detrás las zonas en las que la luz ha sido absorbida, se forma una sombra, la cual se detecta por una cámara de video. A partir de la reconstrucción e interpretación del movimiento de la sombra registrado se puede determinar la distribución de velocidades de los átomos de la nube original, que a su vez indica la temperatura de los átomos del BEC.

Hay métodos más sofisticados mediante los cuales se puede obtener información sobre el estado del condensado y que no resultan destructivos para la nube del condensado, de manera que se pueden realizar diversas observaciones del condensado en distintos estados sin tener que reconstruir cada vez el condensado.



7.- APLICACIONES

La realización de los condensados de Bose-Einstein es consecuencia del trabajo teórico y experimental realizado en este campo durante varias décadas. Pero además, nos conduce al entendimiento del comportamiento de sistemas de naturaleza cuántica formados por una cantidad macroscópica de átomos.

En el campo de los condensados de Bose probablemente el trabajo más interesante que se realiza actualmente es el estudio de la dinámica de estos cuando se confinan en redes ópticas, esto es, redes de luz en las que coexisten un gran número de piezas separadas de un condensado.

El desarrollo de nuevas tecnologías esta sustentado en la capacidad de manipular y controlar estos sistemas cuánticos. Por ejemplo, se especula acerca de la construcción de una computadora cuántica, lo cual requiere no sólo de un conocimiento profundo, sino también un control total de la evolución temporal de estos sistemas.

Estos tres científicos, ganadores del nobel, han abierto las posibilidades para que el Estado Condensado de Bose-Einstein pueda ser utilizado en la fabricación de instrumentos de medición muy sensitivos y para hacer muy pequeñas estructuras como las que se usan en los chips de las computadoras.

Su aplicación mayor será en un “láser atómico” que, en lugar de fotones, emita un rayo de átomos vibrando en el mismo estado mecánico cuántico. Tal láser atómico podría, por ejemplo, permitir construir pequeñísimas estructuras con precisión hasta hoy inédito, técnica de la cual podrían aprovecharse la nanotecnología y la industria de computadoras.

El desarrollo y el conocimiento de las propiedades de este nuevo estado de la materia, podría contribuir en el futuro cercano a la creación de rayos láser microscópicos, que, en lugar de fotones, emita un rayo de átomos vibrando en el mismo estado mecánico cuántico , Tal láser atómico podría, por ejemplo, permitir construir pequeñísimas estructuras con precisión hasta hoy inédito, técnica de la cual podrían aprovecharse la nanotecnología y la industria de computadoras.

Se pueden usar métodos revolucionarios en litografía, que permitan dibujar circuitos de computadora sumamente diminutos, permitiendo la construcción de computadoras de alta velocidad, mayor potencia y muy compactas. Estos rayos láser microscópicos podrían permitir ejecutar también mediciones de alta precisión para sistemas de guía muy exactos y medidores de gravedad, mostrando con precisión de centímetros la posición de los aviones y naves espaciales.

Esta rama de la física y, en concreto este tema, está en pleno desarrollo y cada cierto tiempo se formulan nuevas teorías y se realizan nuevos experimentos y descubrimientos. Un ejemplo es que, hace poco tiempo, un grupo de teóricos propuso que, con átomos fermiónicos atrapados en el interior del vórtice de un condensado de Bose-Einstein, se podrían comprobar algunas predicciones de la física de supercuerdas (rama de la física teórica que intenta unificar todas las fuerzas de la naturaleza), aunque no se ha llegado a ninguna conclusión al respecto.

BIBLIOGRAFÍA

- *Introducción a la mecánica estadística*, Juan de la Rubia Pacheco y Jose Javier Brey Abalo. Ed. del Castillo, 1978.
- http://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:Qz0c8VYbYQcJ:www.tec.cr/sitios/Docencia/fisica/boletin_Fisica/Archivo/N3/NobelFisica2001.pdf+premio+nobel+fisica+2001&hl=es&gl=es&pid=bl&srcid=ADGEESibdDEbBMv0eXzh0EaeCFJ3nTOLL9v5pdm26GqNMG5y54_SiCBrh3dOnHRXaQaO5jHGB0YdYVN7pPd3xHYKu_zkWg5gZA_yzpMzj5_JIpH33J00VN-sB6UWG7Z3DmftZ4z0-Ps&sig=AHIEtbTfIEd0SN2rgoEbJ6nHLTN3PwwAvA
- <http://www.yucatan.com.mx/especiales/nobel2001/10100101.asp>
- http://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:EzXrZJI_YkcJ:fisica.usach.cl/~sochi/boletin/Noviembre2001/nobel02.PDF+premio+nobel+fisica+2001&hl=es&gl=es&pid=bl&srcid=ADGEESjQiJIU3nYC11oP1RBoOE4OkizdR5BBYjXeVwPe_aOGSj7__YhwphGZr1fpFYOpogUHbFaCt1-mNkmD9MvT5OH3UNAU4SyoCZ8LnWGCxQIIPFmG9MiHyiyupSRw1_yjJNK6WvMB&sig=AHIEtbSF6rGtKbGI0eNoYtQitu_SHdBwRQ
- <http://web.mit.edu/newsoffice/2001/ketterle.html>
- <http://themidnightsun.wordpress.com/2009/09/24/eric-cornell-2001-physics-nobel-laureate-at-tce-and-what-a-great-honour/>
- http://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:Yvu1IN366qQJ:cua.mit.edu/ketterle_group/group_info/wk/biography%2520wk.pdf+wolfgang+ketterle+biografia&hl=es&gl=es&pid=bl&srcid=ADGEESg3QAyTUqZ9Vm4v_2ogrlb5jz_T3oFATHLOTdQ8Dok-i8u8ePxb-ftN3j1pozVq0tE0rqIE2d_H4JeDO-Um8rsHWwto6VRnqkSq-G6kY8ynDUDtiuJY7Wyk9gw9LL8uup7TN3ow&sig=AHIEtbRcjTE0D3XALuvmn1WRkIUSKqUug
- http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2001/wieman-autobio.html
- http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/es/Eric_Allin_Cornell
- http://www.revista.unam.mx/vol.6/num7/art67/jul_art67.pdf
- http://www.physics.otago.ac.nz/research/jackdodd/resources/exp_aspects.html and <http://www.colorado.edu/physics/2000/bec/index.html>
- http://translate.googleusercontent.com/translate_c?hl=es&langpair=en|es&u=http://www.physics.otago.ac.nz/research/jackdodd/resources/exp_aspects.html&url=translate.google.es&usg=ALkJrhgiOWknAL9bzY_21Pb27hZINvwT3w#intro
- http://mural.uv.es/ferhue/1o/Condensados_Bose-Einstein_FHG.pdf
- http://es.wikipedia.org/wiki/Condensado_de_Bose-Einstein
- <http://www.neoteo.com/Portals/0/imagenes/cache/99D3x1024y768.jpg>
- http://www.uam.es/departamentos/ciencias/fismateriac/gibt/Common/Docencia/rab_doct/cbe.pdf