

Condensación de Bose-Einstein. El quinto estado de la materia

Gloria Peñaloza*, Ma. de Lourdes Najera**, Fernando Ongay*, Máximo Agüero*

Recepción: 25 de enero de 2006
Aceptación: 21 de febrero de 2006

* Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de México. Instituto Literario 100, Toluca, Estado de México, México. C. P. 50000.

** Plantel Nezahualcóyotl, Universidad Autónoma del Estado de México. Instituto Literario 100, Toluca, Estado de México, México. C. P. 50000.

Resumen. Se presenta una introducción al fenómeno sorprendente de condensación de la materia a temperaturas cercanas al cero absoluto. Este fenómeno está basado en los fundamentos cuánticos de la materia. Sus principales descubridores teóricos fueron S. Bose y A. Einstein. Se inicia con un poco de historia, para luego analizar el comportamiento físico del problema. Posteriormente se abordan algunos aspectos relevantes de sus aplicaciones tecnológicas, a partir de los resultados de investigación de los grupos encabezados por Eric Cornell (NIST), Carl Wieman (Universidad de Colorado) y Wolfgang Ketterle (MIT).

Palabras clave: Condensación de Bose-Einstein, cambio de fase, ondas de materia, solitones.

Bose-Einstein Condensation. The Fifth State of the Matter

Abstract. An introduction to the surprising phenomenon of condensation of matter to temperatures near absolute zero is presented. This phenomenon is based on the quantum foundations of matter, whose main theoretical discoverers were S. Bose and A. Einstein. We begin with a short story of its discovery and continue with an explanation of their important physical properties. Finally, we approach some outstanding aspects of its technological applications, from the results of investigations by the groups headed by Eric Cornell (NIST), Carl Wieman (University of Colorado) and Wolfgang Ketterle (MIT).

Key words: Bose-Einstein Condensation, transition phase, matter waves, soliton.

Introducción

La experiencia de la vida misma nos ha permitido observar fenómenos muy interesantes ligados con la transformación o cambios en una misma sustancia de un estado a otro. Un ejemplo es la condensación del agua líquida en hielo, o del vapor en líquido. Fenómenos muy comunes y a la vez enigmáticos e intrigantes, muy relacionados con el cambio de temperatura de los átomos o moléculas de las sustancias. Con el advenimiento de la nueva ciencia de la mecánica cuántica, en los albores del siglo pasado, se descubrió que

en la naturaleza ocurre otro tipo de condensación de la materia a temperaturas cercanas al cero absoluto.

La mecánica cuántica toma su punto de partida con una hipótesis propuesta por Max Planck el 14 de diciembre de 1900 en la reunión de la Sociedad Física de Berlín, usada en la explicación del fenómeno físico conocido como “radiación del cuerpo negro”. La idea fundamental radica en que la energía de una onda electromagnética pura es proporcional a su frecuencia. En su ponencia apareció por primera vez una nueva constante universal, que denotó como h y conocida como “quantum” elemental de la acción. Justamente esta constante

es la que relaciona a la energía con la frecuencia. Lo elemental fue porque era la más pequeña porción de energía que puede portar en sí una radiación electromagnética. El valor de esta constante es:

$$h = 6.6262 \cdot 10^{-34} \text{ j.sec}$$

La fórmula de Planck se escribe como sigue

$$E = hv$$

Aquí E es la porción más pequeña de energía (sea ondas de radio, rayos x, o cualquier otra radiación electromagnética) que pueda emitir o absorber el átomo, molécula o cristal bajo una frecuencia dada de radiación v . Los físicos empezaron con el estudio de las ondas de luz, y a lo largo de los años llegaron poco a poco a la creación de la mecánica del “quantum”. Pero esta nueva mecánica no es parecida a la que usamos en nuestros cálculos del mundo macroscópico, donde todavía se sigue usando en muchos casos la mecánica de Newton. La diferencia fundamental entre el modelo cuántico y el clásico, consiste en que la mecánica cuántica es una teoría estadística mientras que la mecánica de Newton no lo es. Por lo que al analizar un sistema con un número grande de grados de libertad, se le añade la estadística que surge en los objetos del micromundo, haciendo inevitable que se separe de la estadística clásica.

Antes de abordar el fenómeno de condensación de Bose-Einstein veamos algunas cuestiones fundamentales. En la mecánica cuántica los sistemas físicos se representan por funciones de estado, que describen las propiedades y el comportamiento del sistema y su evolución en el espacio-tiempo se describe mediante una ecuación de onda. La función de Schrödinger de estado es una función especial, la información contenida en dicha función es esencialmente estadística o probabilística. Toda esta teoría es lo que comúnmente se llama interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica. La especificación o determinación de una función de estado es consecuencia de un conjunto de observaciones y mediciones de propiedades físicas o atributos del sistema estudiado; dichas propiedades que pueden medirse, tales como energía, momento lineal, momento angular y otras variables dinámicas, se llaman observables y se representan por objetos matemáticos abstractos llamados ope-

radores. Una magnitud importante que debemos conocer es la llamada longitud de onda de Louis de Broglie. De acuerdo con la hipótesis de De Broglie, los electrones¹ tienen propiedades ondulatorias cuya frecuencia ω y longitud de onda λ se calculan de las siguientes fórmulas:

$$E = h\omega, \lambda = \frac{h}{p} \tag{1}$$

El fenómeno que abordaremos es cuántico. Para explicarlo, primero veamos un concepto que en el mundo microscópico juega un papel fundamental: el spin. Esta magnitud en un eje de proyección arbitraria en el espacio posee, por ejemplo, para los electrones, dos valores. Llamemos a ese eje arbitrario como el eje z cartesiana. Entonces tendremos

$$s_z = \pm \frac{h}{2} \text{ donde, } h = \frac{h}{2\pi}$$

Sucedió que para justificar la ley de conservación del momento angular de partículas cuánticas era necesario añadir un término que contiene al spin a la ecuación de balance que contenía a una constante múltiplo entero o fraccionario de la constante de Planck dividido entre 2π dependiendo de las propiedades de la partícula. Esta revolucionaria idea lo sustentó Wolfgang Pauli uno de los pioneros en la creación de mecánica cuántica. Así, podemos decir que el fotón tratado como partícula elemental tiene spin 1, el electrón, neutrón, etc. poseen spin 1/2 (se sobreentiende que son múltiplos de $h/2\pi$). Es decir, las partículas elementales poseen un momento angular propio intrínseco que lo denominaron spin. O bien, que el momentum de impulso total de una partícula es la suma del momento orbital mas el momentum del spin.

En física se considera que todo sistema debe de encontrarse en determinado estado; por ejemplo, si nosotros sabemos cómo será la evolución de las coordenadas y de sus velocidades correspondientes de un satélite artificial, este conjunto de magnitudes nos determinará su estado. Para el mundo cuántico, generalmente el estado se caracteriza por sus valores energéticos ligado a su función de onda. Posteriormente en el estudio de las partículas cuánticas se descubre que el spin está directamente relacionado con la estructura de su función de onda, originando así diferentes tipos de estadística. A todas las partículas cuyos spines son valores enteros se les denominó partículas bosónicas (en honor a Bose) y a las otras con spin fraccionario se les clasificó como partículas fermiónicas (en honor a Fermi). Las partí-

1. Es más, todas las partículas elementales, los átomos, etc. que poseen energía $E = mc^2$
e impulso $p = mv$.

culas bosónicas poseen energías discretizadas y podemos catalogarlas sobre la base de un estado cuántico que posee el mínimo valor energético posible. Este último será el estado base. Por encima de este estado estarán los sistemas en estados excitados. En cambio para las fermiónicas no podemos hacer lo mismo. Es aquí donde surge el denominado “mar de Dirac”, partículas que ‘existen’ más abajo del estado base o del ‘vacío’ y en estados cuánticos con valores negativos de energía de cualquier valor.

1. ¿En qué consiste la condensación de Bose-Einstein?

La temperatura de cualquier objeto o cuerpo material está ligada intrínsecamente con el movimiento de sus componentes minúsculos que lo conforman. Estos componentes son los átomos que conforman la materia. La sensación de frío o calor que sentimos al interactuar con los objetos son manifestaciones del movimiento aleatorio de los átomos en la estructura molecular que soporta a la materia en uso. Es obvio que estos movimientos no pueden originar la destrucción de la estructura misma de la materia, porque son movimientos en las inmediaciones de sus posiciones de equilibrio. Entonces, la temperatura describe realmente el rango de velocidades de una enorme cantidad de átomos juntos. Es decir, la velocidad de un átomo puede variar, pero el promedio de todos ellos no. Por lo tanto podemos inferir que la temperatura de cero grados (llamada también cero absoluto), sería aquella que no manifiesta movimiento alguno de los átomos. Es la temperatura teórica más baja posible que corresponde aproximadamente a -273.16 °C.

En la naturaleza, la temperatura observable de más bajo valor ocurre en las profundidades del espacio externo, donde se alcanzan temperaturas aproximadas de 3 grados sobre el cero absoluto o cero grados Kelvin. Esta observación tiene referencia teórica con respecto a las teorías del origen del universo, la más representativa es la del llamado Big-Bang. Por el momento, la teoría del *Big-Bang* predice una temperatura de 3 grados sobre el cero absoluto de una radiación de fondo que explicaría la expansión del universo. Afortunadamente esta radiación es isotrópica, es decir, el fondo del universo posee esa temperatura igual en cualquier dirección que la midamos. Pero, últimamente, observaciones astronómicas de satélites con telescopios sofisticados, como el llamado *Cosmic Background Explorer* más conocido como COBE (The Planck Collaboration, 2006) y otros, han descubierto asimetrías en cuanto a la radiación de fondo. Ello ha originado una serie de polémicas e investigaciones que sería oportuno abordar en otro trabajo. La pregunta que viene a colación es, ¿se podrá descender a temperaturas más bajas que podemos

medir en la naturaleza? ¡Eureka! Resulta que sí. Esto lo relatemos más adelante.

Regresemos, entonces, a nuestro tema principal. En 1924 el físico hindú Satyendrat Nath Bose envió a Einstein un trabajo en el cual derivó la ley de Planck de la radiación de cuerpo negro, considerando a los fotones como un gas de partículas idénticas. Debido a problemas de publicación Bose le pidió a Einstein una sugerencia. Éste reconoció la importancia del trabajo y apoyó su publicación. Después de ello, añadió una nota en la que decía que esta nueva estadística puede ser extendida de fotones a partículas masivas. En 1924-1925 Einstein publicó dos trabajos (Einstein, 1924 y 1925) en los cuales generalizó el trabajo de Bose sobre la estadística de los fotones para el caso de un gas ideal con un número dado de partículas. En el segundo trabajo predijo un fenómeno interesante: la condensación de los átomos en un estado cuántico básico a una temperatura suficientemente baja. A este fenómeno se le llama ahora condensación de Bose-Einstein, y ocurre solamente para bosones; es decir, para partículas con spin de valores enteros. Es interesante mencionar que la propuesta inicial para la realización experimental de este cambio de fase debería de realizarse con electrones. Las predicciones de Einstein produjeron muchas controversias; en particular porque era imposible observar este fenómeno en experimentos reales.

La condensación de Bose-Einstein, en la parte teórica de su fundamentación, se basa en algunos principios fundamentales de la Física cuántica; principalmente en la indistinguibilidad de las partículas y en la naturaleza ondulatoria de la materia. Como se mencionó, la función de onda caracteriza la estadística de las partículas cuánticas. Una propiedad importante de la función de onda aparece como consecuencia de la imposibilidad, en principio, de diferenciar dos partículas idénticas. Es decir, aparentemente no debería de suceder nada al hacer una transposición de dos partículas idénticas, por ejemplo, dos electrones o dos neutrones desde un estado al otro. Las magnitudes físicas se expresan a través de la función de onda pero en su forma cuadrática. Por esta razón se tienen dos posibilidades que no violan la transposición. La primera consiste en que durante la transposición la función de onda no cambia, y la segunda en que la función de onda cambia solamente de signo. Wolfgang Pauli demostró que la primera posibilidad se da para partículas con spines enteros y la segunda para partículas con spines fraccionarios. Entonces la función de onda cambia de signo para partículas fermiónicas. Por ejemplo, para dos electrones –el spin del electrón es igual a $1/2$ – la función de onda cambia al hacer una transposición de ellas. Pero no cambia cuando se transpone a dos pi-mesones o dos fotones –el spin del pi-mesón es 0 y del fotón es 1.

Ahora no es difícil de entender *El principio de exclusión de Pauli*: “Dos partículas idénticas de spin fraccionario no pueden hallarse en el mismo estado cuántico”. Así, si dos partículas idénticas se encuentran en el mismo estado, su transposición no puede cambiar a la función de onda. Pero al mismo tiempo, por el teorema de Pauli, la función de onda debe cambiar de signo. Entonces, en este caso la función de onda será igual a cero, pero la función de onda nos define la probabilidad de encontrar la partícula en ese estado. Si esta función de onda es cero, entonces el estado no es posible y por consiguiente dos partículas idénticas con spin fraccionario no pueden encontrarse en el mismo estado cuántico.

Preguntémosnos: ¿Cómo están distribuidas las partículas de un gas ideal por los impulsos a una temperatura de cero absoluto? Veamos el caso de las partículas bosónicas. Cuando el sistema alcanza una temperatura de cero absoluto, ésta se encontrará en un estado con la energía mínima posible. Para el caso de partículas de Bose (partículas con spines enteros) todos ellos se encontrarán en un estado mínimo posible. Pero para el caso de partículas de Fermi (partículas con spines fraccionarios) se tiene el Principio de Pauli: en cada estado no pueden encontrarse más de una partícula.

La condensación de Bose-Einstein (CBE) es un fenómeno de cambio de fase. Entonces lo interesante es indagar la temperatura crítica a la que puede ocurrir este cambio de fase. Veamos, cuando se tiene una temperatura alta, la función de distribución de átomos por su impulso es (Pitaevsky, 1998).

$$n_p = \frac{1}{\text{Exp}\left(\frac{\epsilon(p) - \infty}{kT}\right) - 1}, T > T_c^0 \quad (2)$$

Donde λ el potencial químico del gas, y $\epsilon(p) = p^2/2m$. Esta situación cambia cuando la temperatura alcanza un valor crítico T_c^0 de cambio de fase del gas, es decir, cuando alcanza una temperatura:

$$T_c^0 = 3.31 \frac{\hbar^2}{m} n^{2/3}, \text{ donde } n \text{ es la densidad del gas.}$$

Para valores menores a esta temperatura, el número de átomos, que lo denotamos como N_0 , es extremadamente grande en el estado cuántico determinado en el que los impulsos se tornan ceros o tengan velocidades nulas: $\mathbf{p} = 0$, es decir, se puede considerar proporcional al número total de átomos N .

$$N_0 = N \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^{3/2} \right], T > T^0.$$

Aquí se usó el convencionalismo de que la temperatura tenga unidades energéticas, es decir, la constante de Boltzman es $k_b = 1$. Todos los demás átomos se distribuirán de acuerdo a la ecuación (2) pero con potencial químico $\infty = 0$. Adicionando partículas a dichos sistemas a temperatura fija, en primer lugar crecerá el número de partículas excitadas mediante el crecimiento de ∞ hasta que su valor sea lo suficientemente cercano a ϵ_0 . En este punto, la población del estado excitado se satura y el estado base se torna microscópicamente ocupado, que es la esencia de la condensación de Bose-Einstein.

La “temperatura crítica” se puede calcular entonces igualando el número crítico de partículas con el número de partículas excitadas cuando $\infty = \epsilon_0$.

Por ejemplo, para el caso en que los átomos tengan un momento magnético diferente de cero, pueden usarse trampas magnéticas para confinarlos. Los átomos se concentran en las cercanías del potencial de la trampa magnética. La interacción de estos átomos con la trampa puede describirse introduciendo un potencial externo V_{ext} . En condiciones experimentales este potencial puede considerarse del tipo armónico.

$$V_{ext}(r) = \frac{m}{2} (\omega_x^2 x^2 + \omega_y^2 y^2 + \omega_z^2 z^2). \quad (3)$$

Suponemos entonces que a los átomos se les mantiene en las inmediaciones de un mínimo del potencial de la trampa magnética. La interacción de los átomos con esta trampa se puede describir por el potencial (3). Pero ahora es necesario tomar en cuenta la interacción de los átomos y la energía cuántica del llamado “oscilaciones cero”. Cuando estos efectos no se toman en cuenta, el condensado que no posee presión térmica se reuniría entonces en un punto cercano al mínimo del potencial. Los efectos mencionados prohíben que ocurra este colapso, pero el condensado forma de todas maneras un máximo de densidad en las cercanías del mínimo.

En este caso, el potencial externo se modela para un gas de partículas que no interactúan; y cuando se calculan las expresiones en el límite termodinámico, se obtiene la siguiente expresión para la temperatura crítica de condensación:

$$kT_c \approx 0.9\hbar(N_c \omega_x \omega_y \omega_z)^{1/3}.$$

Aquí las cantidades ω_i se refieren a las frecuencias de la trampa anisotrópica que contiene al sistema de acuerdo a la ecuación (3). Cuando se calculan estas cantidades para sistemas observables, experimentalmente se obtiene una diferencia de alrededor de 2-6%.

Se puede explicar también la condensación de Bose en analogía con la física del láser. Así, se conoce que la longi-

tud de onda de De Broglie (Λ_{bro}) está relacionada con la temperatura T mediante la siguiente fórmula:

$$\Lambda_{bro}(T) = \sqrt{\frac{2\pi\hbar}{mkT}} \tag{4}$$

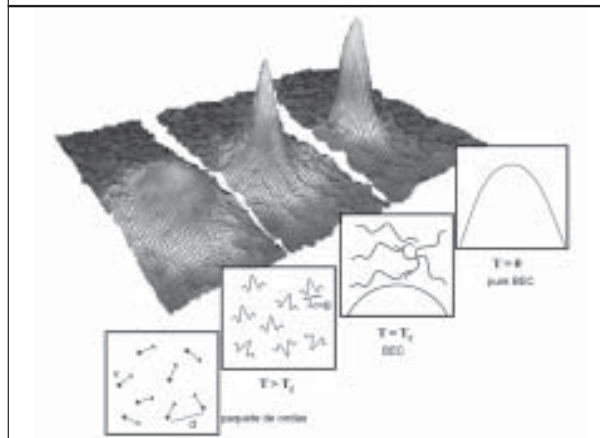
De esta expresión, está claro que la longitud de onda de la partícula crecerá con la disminución de la temperatura. Al disminuir la temperatura, o aumentar la densidad n , del ensamble atómico conllevará a que los paquetes de onda se traslapen originando un cambio de fase. Entonces, cuando la longitud de onda se torna comparable con las distancias inter partículas es cuando ocurre el cambio de fase. Un esquema que ilustra esta situación se presenta en la figura 1; se observa la transición desde una nube térmica con una distribución simétrica de momentos hacia una función de onda mecánico cuántica con una asimetría de la distribución de momento.

Si ahora se enfría bajando la determinada temperatura T_c , la parte significativa de átomos se condensa en estados cuánticos con energía lo suficientemente baja. Los paquetes de onda atómicos comienzan a superponerse y el gas se transforma en “sopa cuántica” de partículas indiferenciables. Cuando T se hace aproximadamente igual a cero se obtiene la condensación pura de Bose-Einstein y se forma una onda ‘gigante’ de materia.

2. Ecuación de Gross-Pitaevsky

Las bases teóricas para la descripción de un *Bose gas* lo realizó Bogoliubov en 1947 (Bogoliubov, 1947). La idea principal de su

Figura 1. La temperatura disminuye desde la parte izquierda abajo hasta la derecha arriba. Se aprecia el aumento de la longitud de onda de De Broglie hasta que se produce un traslape originando el cambio de fase hacia la condensación. Las imágenes más arriba son las correspondientes experimentales de un ensamble de átomos de rubidio (BEC Home, 2000).



aproximación consistió en separar la parte ‘clásica’ de la función de onda principal (ahora ya considerada como un operador). Es decir, consideramos a esta magnitud de la siguiente forma:

$$\hat{\psi}(r,t) = \psi_0(r,t) + \hat{\theta}(r,t)$$

Entonces, el problema radica en obtener una ecuación que nos determine cómo evoluciona la parte clásica de la función de onda $\psi_0(r, t)$. Esto se complica porque al no tomar en cuenta el segundo miembro en la ecuación anterior, significa desprestigiar todo tipo de correlación entre átomos. Afortunadamente esta dificultad desaparece si consideramos que el potencial de interacción entre átomos satisface lo que se llama la aproximación de Born, es decir, que la amplitud de onda de dispersión de los átomos sea mucho menor que el radio de acción del potencial interatómico.

Podemos resumir que la condensación de Bose-Einstein consiste en que un gran número de átomos microscópicamente se “condensan” en un estado cuántico. El análisis matemático de este fenómeno cuántico se realiza mediante el método de segunda cuantización, es decir, se considera a la función de onda de este sistema como si fuese un operador $\hat{\psi}(x, t)$. Pero como se tiene una gran cantidad de partículas bosónicas en este estado cuántico, este operador se puede reemplazar por su análogo clásico denominado función de onda $\psi(r, t)$. Este reemplazo es análogo al traspaso desde la electrodinámica cuántica a la teoría clásica de fenómenos electromagnéticos, cuando se tiene enorme cantidad de fotones y por consiguiente se puede describir este campo electromagnético mediante las funciones clásicas de campo eléctrico $E(r, t)$ y magnético $H(r, t)$. Para mayores detalles del análisis teórico de este fenómeno puede consultarse, por ejemplo, Pitaevsky (2006).

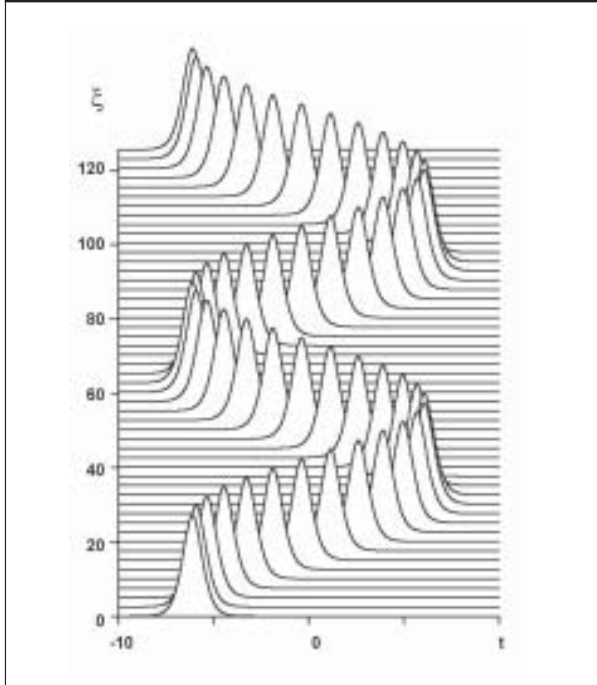
A partir de estos puntos fundamentales E.P. Gross y L.P. Pitaevskii obtuvieron, de manera independiente, en 1961, la siguiente ecuación no lineal (Pitaevsky, 1961 y Gross, 1961):

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi_0(r,t) = \left[-\frac{\hbar^2 \nabla^2}{2m} + V_{ext}(r) + g|\psi_0(r,t)|^2 \right] \psi_0(r,t). \tag{5}$$

La parte no lineal de esta ecuación describe la interacción entre átomos del condensado y la constante de interacción g se define como $g = \frac{4\pi \hbar^2 a}{m}$, donde a es la amplitud de dispersión-s del átomo y m su masa.

Cuando se tiene un gas suficientemente diluido a bajas temperaturas su comportamiento ya no depende del potencial sino solamente de la amplitud de dispersión de los átomos, por lo que la ecuación de Gross-Pitaevskii es correcta fuera de la aplicación de la aproximación de Born. En este

Figura 2. Dinámica no lineal del solitón de la ecuación de Gross Pitaevskii en un potencial armónico. Aquí por x se entiende el eje espacial y a t se considera como el eje temporal (Hernandez *et al.*, 2005).



caso el átomo se mueve, es decir, se comporta como si estuviera en un campo promedio creado por los otros átomos. Por esta razón a la teoría fundamentada por la ecuación de Gross-Pitaevsky se le denomina Teoría de “Campo Promedio”.

Esta ecuación no lineal describe la dinámica de un *Bose gas* poco denso a temperatura $T = 0$. Esta ecuación es clásica en el sentido de que la función de onda ψ_0 no es un operador y no define la densidad de probabilidad sino más bien la distribución real de átomos del condensado en el espacio con una interacción par. En el caso, en el que interactúan más de dos partículas, por ejemplo tres partículas, la ecuación se generaliza para obtener una ecuación similar a la denominada cúbica quinta de Schrödinger de la siguiente forma:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi_0(r, t) = \left[-\frac{\hbar^2 \nabla^2}{2m} + V_{ext}(r) + g|\psi_0(r, t)|^2 + \beta |\psi_0(r, t)|^4 \right] \psi_0(r, t). \quad (6)$$

Estas ecuaciones son estudiadas por varios grupos de investigación importantes mediante diversas técnicas analíticas y numéricas. Una parte considerable de lo sorprendente

de dichas investigaciones consiste en que los resultados están intrínsecamente ligados a soluciones especiales de la física no lineal denominados solitones.

Recientemente en el trabajo de Hernandez *et al.* (2005) se reporta una solución de la ecuación (6) tipo solitónica para un potencial externo armónico (3) cuya gráfica se muestra en la figura 2.

Como vemos, los CBE pueden ser descritos como solitones, entendiendo por solitón, a un pulso de onda que es capaz de trasladarse sin perder su forma y energía; además, es capaz de conservar su forma después de colisionar con otro solitón. Como ya se mencionó, las partículas que conforman el CBE están en el mismo estado cuántico, éste exhibe propiedades ondulatorias y, por lo tanto, puede considerarse como una onda atómica.

3. Desarrollos experimentales y aplicaciones

En 1995 los grupos encabezados por Eric A. Cornell y Carl E. Wieman de la Universidad de Colorado, y por Wolfgang Ketterle del Instituto de Tecnología de Massachusetts, lograron crear por primera vez la condensación de Bose-Einstein en gases enrarecidos de Rubidio-87 y átomos de sodio. La técnica experimental permitió observar el CBE en una nube de metales alcalinos a una billonésima sobre cero absoluto de temperatura. Estos experimentos les hicieron merecedores de Premio Nobel en Física (Ketterle *et al.*, 1999; Cornell, *et al.* 1999 y Bongs and Sendstock, 2004). Ésta es la temperatura más baja registrada en la Tierra.

La condensación de Bose-Einstein juega un papel importante en la teoría de muchos fenómenos físicos: la superfluidez del Helio, los electrones en superconductores, excitones en dieléctricos, etc. Experimentalmente la condensación de Bose-Einstein (CBE) se realiza esquemáticamente de la siguiente manera: se usa a los átomos de metales alcalinos. Los átomos de los metales alcalinos poseen momentos magnéticos. Gracias a esta propiedad se les pueden confinar en los llamados “trampas magnéticas”. Una vez confinados los átomos, se les enfría. El enfriamiento se produce en dos etapas. En la primera, a los átomos se les enfría mediante una técnica de “enfriamiento láser”.

Recordemos la mitología griega relacionada con el desdichado Sisyphus. Este condenado debe hacer rodar una roca desde la base hasta la cima de una montaña en el inframundo. Pero una vez en la cima, la piedra rodará hacia la base de la montaña, y el proceso se repetirá eternamente. Algo análogo sucede cuando se usan láseres para

enfriar átomos. A este método se le llama también “enfriamiento Sisyphus”. Los átomos se mueven en una superficie sinusoidal de potencial modulada, que ocurre a través de los cambios en sus energías cuando ellos interactúan con luz. Cuando ellos suben la ‘montaña’ del senoide pierden velocidad. Pero cuando llegan a la cima ‘ópticamente’ se les empuja hacia el valle del senoide. Por esta razón los átomos siempre viajan hacia ‘arriba’ y sus velocidades se verán gradualmente disminuidas, enfriándolas paulatinamente. En la segunda etapa, a los átomos se les permite escapar o evaporarse de la trampa. Debido a que los átomos con mayor energía son los que se escapan más rápidamente, entonces, esta evaporación conlleva al enfriamiento del gas. Como se puede ver, este proceso es análogo al enfriamiento de un café caliente en una taza abierta. De esta manera se producen temperaturas del orden de pico kelvins y se puede observar la condensación. En nuestros días, ya se tienen varios grupos que han alcanzado la condensación de Bose-Einstein (Cornell, Ensher y Wieman, 1999).

Los investigadores aseguran que podrían alcanzar temperaturas más bajas debilitando la trampa y reduciendo el número de átomos, pero admiten que podría ser “técnicamente difícil”. El desarrollo experimental del fenómeno de condensación de Bose-Einstein tardó 70 años en realizarse, y aún así se puede decir que falta mucho por estudiar. Este fenómeno físico es de gran importancia y se prevé que en un futuro tendría muchísimas aplicaciones. Veamos, por ejemplo, la similitud entre los CBE y la luz de láser. En un láser ‘todos’ los fotones son iguales, son del mismo color, tienen la misma energía y dirección. En comparación con el CBE, éste es un tipo de ‘entidad’ especial, donde todos los átomos que forman el condensado son uno mismo, es decir, forman una sola masa de tal manera que no podríamos distinguir un átomo del resto. Ello significa que tendremos mayor control de la velocidad en que se están moviendo y del valor en que se encuentran. De hecho podemos controlarlo tanto como nos permita el principio de incertidumbre de Heisenberg. A partir de esta similitud, con la luz láser es muy posible que los CBE sean utilizados en el desarrollo de instrumentos de medición muy sensibles y, tal vez, para construir estructuras muy pequeñas, como los chips de computadoras, para la espectroscopia, la metrología y los usos atómicos de la óptica.

La aplicación tecnológica en los CBE ayudaría a crear versiones de aparatos de medición más exactos: por ejemplo giroscopios, para una navegación ultra precisa, y la creación de relojes atómicos exactos. Se esperaría que los CBE tengan grandes aplicaciones en el futuro.

Analogías y conclusiones

Los investigadores han tratado de llevar la astrofísica del espacio profundo a sus laboratorios haciendo posible el estudio de las estrellas de neutrones (que tienen aproximadamente el tamaño de la Isla de Manhattan, pero a pesar de su tamaño son más masivas que el Sol). La densidad es tal que una cucharadita de materia de una de ellas, pesaría cerca de mil millones de toneladas. En su interior son fluidos; cada una contiene un ‘océano’ de neutrones, los cuales son los restos de los átomos destruidos por la explosión de una supernova. Todo el conjunto puede girar cientos de veces por segundo para producir poderosos huracanes cuánticos dentro de las estrellas.

Por otro lado, se sabe que los CBE son ondas de materia que se forman cuando los átomos están muy ‘fríos’, estos átomos se unen para formar una sola “burbuja mecánico-cuántica”. En 1995 se encontró que una burbuja de 0.1mm de largo contenía cerca de diez mil millones de átomos.

La pregunta que surge es: ¿qué tienen que ver las estrellas de neutrones con los CBE? Se sabe que los CBE son más de 100 mil veces menos densos que el aire y más fríos que el espacio interestelar; por otro lado, las estrellas de neutrones pesan más de 100 millones de toneladas por cm^3 y su interior es más de 100 veces más caliente que el núcleo solar. Desde un primer punto de vista, parece que no tienen características comunes, sin embargo, existe una propiedad muy importante, común a los dos, que nos permite relacionarlos. Estos dos fenómenos se comportan como superfluidos, es decir, ambos fluyen rápidamente sin fricción y sin viscosidad. Los superfluidos no pueden girar como un cuerpo rígido. Para girar deben arremolinarse, según Ketterle, el bucle de velocidad debe ser cero lo cual es válido para los BEC.

Durante el 2001 se realizaron experimentos similares a los realizados por Ketterle y el MIT, en uno de ellos hicieron girar un BEC, al mismo tiempo se apuntó un rayo láser giratorio sobre el condensado, el cual era sostenido por magnetos. De pronto apareció un conjunto de remolinos. El conjunto de remolinos formados en uno los CBE giratorios se parecían a los encontrados en las estrellas de neutrones. Muchas de las estrellas de neutrones son pulsares, es decir, emiten radiación a medida que giran. Según Ketterle, si los átomos del CBE pudieran atraerse entre sí, entonces, todos los condensados pudieran colapsarse. Algunos investigadores suponen que la física de los CBE es la misma que la de una estrella de neutrones

colapsados, por lo que, de alguna forma, es como construir una estrella de neutrones miniaturizada en una pequeña cámara de vacío.

Como los CBE se forman con la ayuda de trampas magnéticas, Carl Wieman y sus colegas descubrieron que pueden hacer que los átomos dentro de un CBE se atraigan o se repelan entre sí sintonizando el campo magnético de la

trampa. Con esta idea pudieron realizar un CBE débilmente autoatrayente. Comenzó a encogerse también como se esperaba, pero de pronto hizo algo inesperado: ¡explotó! A este fenómeno posteriormente se le bautizó con el enigmático nombre de *Bosanova* en honor a Bose y a su gran parecido a la explosión de una supernova, era la explosión más débil nunca antes observada.



Bibliografía

- Bogoliubov, V. N. (1947). *Investia Byzov*. Academia de Ciencias CCCP, Serie física. 11, 77.
- Bongs, K y K. Sendstock (2004). *Physics with Coherent Matter Waves*. Arxiv: cond-mat /0403128 v1, Marzo.
- Cornell, E.A.; J.R. Ensher y C.E. Wieman (1999). *Experiments in Dilute Atomic Bose-Einstein Condensation*. Arxiv: cond-mat /9903109 v1, Marzo.
- Einstein A. Berl. Ver. 22, 261(1924); 23 3 (1925); 23 18(1925).
- Gross E. P. (1961). *Nuovo Cimento*. 20, (454).
- Hernandez, T.; V. Villagran *et.al.* (2005). "Dynamics of Solitons in the Model of Nonlinear Schrodinger Equation with an External Harmonic Potential. I: Bright Solitons". *Quantum electronics*. 35 (9).
- Ketterle, W. (2002). "Nobel Lecture: When Atoms Behave as Waves Bose-Einstein Condensation and the Atom Laser", *Reviews of Modern Physics*. Vol. 74, núm. 4.
- Ketterle W., D.S. Durfee y D.M. Stamper-Kurn (1999). *Probing and understanding Bose Einstein condensates*. Arxiv: cond-mat /9904034 v2, April.
- Pitaevsky L. P. _____ (2006). *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, Vol. 176, 345-364.
- _____ (1961). *Zhurnal de Física Teórica y Experimental*. 40, 646.
- _____ (1998). *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. Vol. 41, núm. 6, 525-626.
- The Planck collaboration (2006). *The Scientific Programme of Planck*. astro-ph/0604069.
- University of Colorado (2000). *BEC Home*. <http://www.colorado.edu/physics/2000/bec/>

CIENCIA
ergo sum

Revista científica multidisciplinaria de la UAEM
 Informes: Francisco P. Castañeda 105, col. Universidad, C.P. 50130, Toluca, Estado de México.
 Tels y fax: (722) 277 38 35 y 277 38 36, exts. 106 y 105
<http://ergosum.uaemex.mx>, Correo electrónico: ergo_sum@uaemex.mx
 *descuento a universitarios