



EL QUINTO ESTADO: EL CONDENSADO DE BOSE-EINSTEIN (BEC)

ARTÍCULO DE DIVULGACIÓN

Adriano Ibarra – Durán

Servicios de Laboratorio S.A., SERLAB S.A.

e-mail: adrian_ibarra@hotmail.com

RESUMEN

En 1995, tras muchos intentos fallidos y superar varios obstáculos, se logró enfriar un gas de átomos alcalinos a temperaturas del orden de 10^{-7} K. A esta temperatura, los átomos se “unen” para formar el Condensado de Bose-Einstein (BEC). El BEC constituye otro estado de la materia, cuyas propiedades son objeto de estudios hoy día. El BEC había sido predicho por Einstein (1924) cuando analizaba el trabajo de S.N. Bose (sobre Mecánica Estadística), pero tuvo que esperar el desarrollo y perfeccionamiento de técnicas para atrapar y enfriar átomos, de las últimas dos décadas. En este trabajo, se repasan los aspectos más importantes de algunas de estas técnicas y otros elementos de la formación del BEC. En el año 2001, y en reconocimiento a su trabajo, E. Cornell (EUA), C. Weimann (EUA) & W. Ketterle (Alemania), fueron galardonados con el premio Nóbel de Física, por el descubrimiento del quinto estado de la materia.

PALABRAS CLAVES

Condensado de Bose-Einstein, MOT, TOP, Premio Nóbel de Física (2001), Quinto Estado de la Materia, Enfriamiento de Átomos.

ABSTRACT

In 1995, after many failures attempts and after overcoming several obstacles, it was possible cool down a gas of alkali atoms at temperature on the order of 10^{-7} K. For this temperature the atoms bond together to form the Bose-Einstein Condensate (BEC). The BEC is another state of matter and its properties are being studied today. The BEC was predicted by Einstein (1924) when he analyzed the work of N.S. Bose (about statistical mechanics) but it had to wait for the development and improvement

of the techniques to cool and trap atoms, in 1980's y 90's. In this work, we'll review those some of these techniques and other elements for BEC formation. In recognition of their work, at 2001, E. Cornell (USA), C. Weimann (USA) & W. Ketterle (Germany) were awarded with the Nobel Prize in Physics for the discovery of BEC; the fifth state of matter.

KEYWORDS

Bose – Einstein condensate (BEC), MOT, TOP, Physics Nobel Price (2001), Fifth State of Matter, Atoms cooling.

INTRODUCCIÓN

El 5 de junio de 1995, en Boulder Colorado (EUA), un grupo de investigadores, liderados por Eric Cornell y Carl Weiman, lograron atrapar y enfriar átomos de rubidio-87 a temperaturas del orden de 10^{-7} K. A esta temperatura, los átomos muestran un comportamiento peculiar. De hecho, éstos se “unen” o “condensan” para formar, lo que podríamos llamar un “súper-átomo”. Es decir, los átomos de rubidio pasan a formar una entidad única, perdiendo su individualidad. Desde otro punto de vista, se dice que las partículas del sistema se encuentran en el mismo estado cuántico.

El estado “condensado” de los átomos, es una forma de materia jamás vista antes de esa fecha y sus propiedades son objeto de numerosas investigaciones en la actualidad. Sin lugar a dudas, es un nuevo estado de la materia, además de lo conocidos, líquido, gas, sólido y plasma.

Es notable que este nuevo estado fuera predicho por los físicos Satyendra Nath Bose (India) & Albert Einstein (Alemania) en 1924. Analizando las ecuaciones de la estadística que siguen los gases Bosónicos¹ (Estadística de Bose-Einstein), se vislumbró la posibilidad de que todos los átomos del sistema ocuparan el mismo estado cuántico, por debajo de una temperatura extremadamente baja (llamada temperatura crítica, T_c).

En honor a quienes predijeron su existencia, el nuevo estado de la materia recibió el nombre de Condensado de Bose-Einstein (BEC; por sus siglas en inglés). Éste es el quinto estado de la materia, que brevemente trataremos.

¹ Bosones: Partículas de spin entero.

LA IDEA

Originalmente, la estadística de Bose-Einstein fue deducida para los cuantos de luz o fotones, sin embargo, Einstein estudio la posibilidad de aplicarla a partículas materiales. Durante estos análisis, Einstein se percató que a temperaturas por debajo de T_c , “todas” las partículas que constituían el gas pasarían a ocupar el mismo estado cuántico, correspondiente a la energía más baja posible. Este resultado asombró a Einstein, ya que ningún sistema conocido, presentaba tal comportamiento.

De manera visual, en la Figura 1a se muestra la distribución más probable de un gas de bosones en equilibrio térmico para a dos temperaturas, por encima de T_c . En la Figura, vemos que a bajas temperaturas, la población de los niveles menos energéticos, aumenta rápidamente. Cuando el sistema se encuentra a una temperatura por debajo de T_c , el gráfico se torna como la Figura 1b. Observe que se tienen un gran número de partículas (todas las del sistema) en los niveles de energía más bajos posibles. Este efecto, produce un salto en la función de distribución, muy cerca del origen del gráfico. Cuando esto ocurre, se ha alcanzado el BEC.

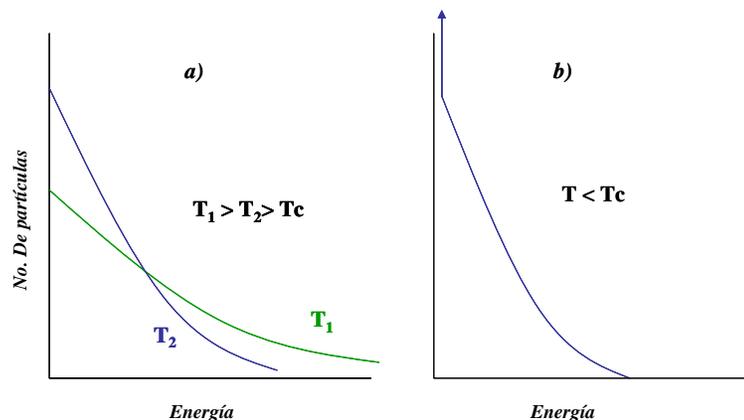


Fig. 1. Diagrama de la función de distribución de Bose – Einstein: a) para dos temperaturas T_1 y T_2 , por encima de la temperatura crítica y b) por debajo de dicha temperatura.

OBSTACULOS

Además de la temperatura del sistema y la energía de las partículas, existe otro parámetro muy importante para lograr el BEC; este es la densidad de la muestra de gas.

Como es conocido, en comparación con los líquidos y sólidos, la densidad de los gases es bastante baja (del orden de 10^{20} cm^{-3} a TPN²). Sin embargo, si un sistema gaseoso (por ejemplo, vapor de agua) se enfría, tendremos que su densidad aumentará, hasta que ocurra una transformación de fase y se convierta en una sustancia líquida. Si se continúa descendiendo la temperatura, su densidad aumentará hasta solidificarse.

Aunque no todas sustancias siguen esta conducta, la idea general es la misma: Un descenso en la temperatura implica un aumento en la densidad. ¿Cómo podremos obtener un *gas* de bosones a temperaturas del orden de 10^{-7} K , para observar la formación del BEC?

Esto se puede lograr, evitando la existencia de “centros de nucleación”. Para la formación de gotas o cristales, es necesario que los átomos o moléculas, se aglomeren en torno a algún “cuerpo”. Estos cuerpos, actúan como centros de nucleación, ya que son los núcleos de las futuras gotas o cristales.

Generalmente las paredes del sistema, así como el polvo o impurezas, actúan como centro de nucleación. Así es que, si se evita que el gas toque las paredes del sistema, y al mismo tiempo se asegura un sistema extra-limpio, tendremos un gas en estado metaestable.

Por otro lado, la colisión de dos átomos del gas, solo propicia el intercambio de energía entre ellos, sin que ellos puedan quedar unidos. Sin embargo, cuando tres átomos chocan simultáneamente, entre sí, puede suceder que el choque no sea del todo elástico y dos de ellos queden unidos, como en una molécula, mientras que el tercero lleva consigo la energía restante. La molécula o moléculas que se formen, rápidamente, servirán como centros de nucleación, y a la licuefacción del gas. Para evitar esto, es necesario mantener una baja densidad para el gas, del orden de 10^{12} cm^{-3} .

ASPECTOS EXPERIMENTALES

Para obtener el BEC es necesario utilizar una serie de técnicas experimentales, de las cuales, las más importantes serán detalladas aquí.

² temperatura y presión normal (273 K y 1 atm).

1. Trampa Magneto-Óptica (MOT)

En primera instancia es necesario atrapar un gran número de átomos (a temperatura ambiente) y luego enfriarlos. Para esto, se utiliza una Trampa Magneto-Óptica (MOT, por sus siglas en inglés), es decir, una que combina las características de las *melazas ópticas* y las propiedades de los campos magnéticos. Esencialmente, el MOT consiste en 3 pares de láseres contra propagantes, circularmente polarizados (derecha, $\sigma+$ e izquierda, $\sigma-$), en cuya intersección se ubican los átomos que se desean enfriar.

El MOT también cuenta con dos bobinas del tipo anti-Helmholtz, ya que la corriente en ellas circula en direcciones opuestas. El campo magnético resultante (B) forma un cuádrupolo esférico. Este tipo de campo, se anula en el centro de la trampa, donde los láseres se interceptan, y aumenta su intensidad, conforme se aleja de este punto; es lo que se llama un gradiente de Campo. En la Figura 2, se muestra un esquema de este tipo de Trampa.

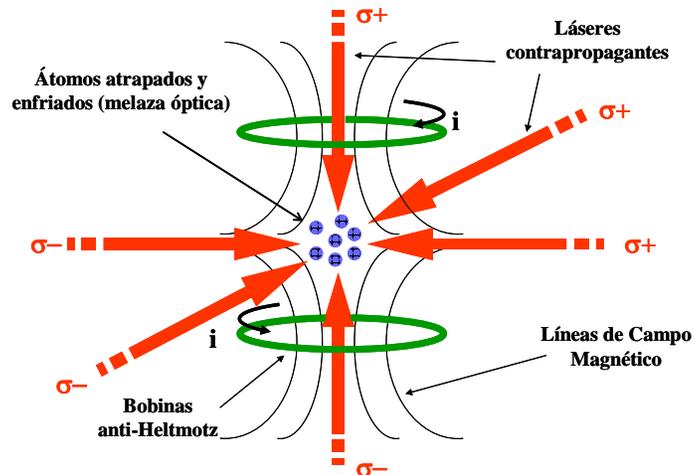


Fig. 2. Modelo de una Trampa Magneto-Óptica (MOT).

La alta eficacia del MOT, para enfriar y contener los átomos, se debe a la acción simultánea de dos mecanismos:

a) Enfriamiento Doppler en un MOT:

Aunque la intensidad del gradiente de campo magnético no es suficiente para contener los átomos, su presencia permite la acción del efecto Zeemann³.

Los átomos en la vecindad central del MOT interactúan con el campo magnético cuadrupolar y, por efecto Zeemann, desdoblan sus niveles energéticos, de acuerdo al momento angular de cada nivel. Esto, aumenta la probabilidad de absorber fotones láseres, que por estar polarizados circularmente, llevan un momentum angular ($-1\hbar$ o $+1\hbar$). Veamos un ejemplo.

En la Figura 3 se muestra un esquema lineal del desdoblamiento de los niveles del átomo, a lo largo de la dirección z . Se ha tomado, por simplicidad, el estado base (b) con momentum angular total nulo ($J = 0$) y el estado excitado (e) con $J = 1$.

Observe que en el centro de la trampa ($z = 0$) no existe desdoblamiento alguno.

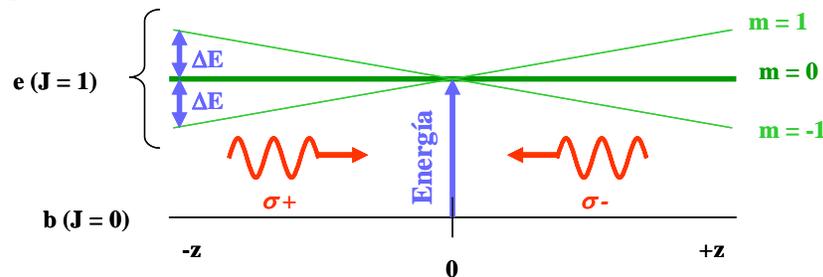


Fig. 3. Modelo unidimensional de la dependencia del efecto Zeemann (ΔE) de la posición, en un MOT.

Sin embargo, conforme se aleja de esa posición, el efecto Zeemann se hace más intenso debido al incremento del campo magnético⁴. Sea el caso de un átomo en la posición $+z$, cercana al centro. Según la Figura 3, tal átomo tiene mayor probabilidad de absorber un fotón con polarización $\sigma-$, que uno con polarización $\sigma+$, por lo que podrá excitarse al subnivel $m = -1$ (más cercano, energéticamente). Un razonamiento análogo se sigue para los átomos en $-z$.

³ Desdoblamiento de los niveles energéticos de un átomo, en presencia de un campo magnético externo.

⁴ Para el efecto Zeemann, $\Delta E = \mu B m$. m =proyección del momentum angular y μ =momento magnético del átomo.

El momentum lineal neto que experimenta el átomo, es producto de la absorción y posterior emisión de fotones. Sin embargo, debido al carácter aleatorio de la emisión, y luego de varios procesos de absorción-emisión, no se producirá un efecto mecánico neto sobre el átomo. Pero la absorción inicial, siempre ocasionará una disminución de la velocidad en la dirección del movimiento, y al mismo tiempo “empuja” al átomo hacia el centro de la trampa.

Por otro lado, debido a la velocidad relativa de los fotones y átomos, es preciso disminuir la frecuencia de los láseres para que los átomos (en rumbo de colisión con los fotones) “vean” que éstos poseen la frecuencia (energía) necesaria para ser absorbidos. Esta es una forma de efecto Doppler óptico. De allí que este mecanismo se denomine “enfriamiento Doppler”.

b) Enfriamiento Sísifo:

Además del enfriamiento Doppler que hemos tratado, el gradiente de polarización debido a la superposición de los láseres polarizados origina un tipo de enfriamiento llamado “enfriamiento Sísifo”. Aunque no se detalla aquí el mecanismo, el enfriamiento Sísifo hace que la energía de los átomos dependa de su posición dentro del MOT. De tal forma, que cuando el átomo avanza a través del MOT, pierde una cantidad de energía cinética, que se transforma en energía potencial, y luego se emite como un fotón (Ver ref. 5).

En síntesis, el MOT logra contener y enfriar los átomos a temperaturas del orden de $10 \mu\text{K}$, pero aun no es suficientemente frío para lograr el BEC.

2. Enfriamiento Evaporativo

Este tipo de enfriamiento es el más comúnmente observado en la naturaleza, pero en el que menos se medita.

Pensemos en una taza de café caliente, y en el vapor que sale de ella. Si se deja esta taza a la intemperie, eventualmente se enfriará, alcanzando la temperatura del medio circundante ¿Cómo ocurre esto? El vapor que abandona la taza, no son más que moléculas de café que poseen una energía mayor que el promedio de las moléculas del café, de tal forma que pueden superar la barrera energética de la superficie y

escapan de la taza, llevando consigo una parte de la energía inicial del café.

Luego que muchas moléculas, con energía promedio altas, abandonan la taza, las moléculas restantes poseerán una energía promedio menor que la inicial, por lo tanto el café se enfría.

Este mismo mecanismo se utilizó para obtener el BEC por primera vez. Es decir, se necesita una “taza” para contener los átomos de rubidio, y luego dejar escapar los más energéticos, de tal manera que la energía (temperatura) promedio restante disminuya. Esto debe hacerse con sumo cuidado, ya que si se dejan escapar muchos átomos rápidamente, no quedaran suficientes para obtener el BEC. La densidad juega un papel importante, como ya lo hemos mencionado.

a) Potencial Tiempo-Orbital (TOP):

La “taza” donde se colocan los átomos de rubidio se construye apagando los láseres que sustentan el MOT, y luego, generando un campo similar al utilizado en el MOT, pero mucho más intenso. El campo magnético de esta “trampa magnética estática convencional”, se anula en el punto central y aumenta su valor conforme nos alejamos de este punto. La Figura 4 muestra la forma de este potencial magnético.

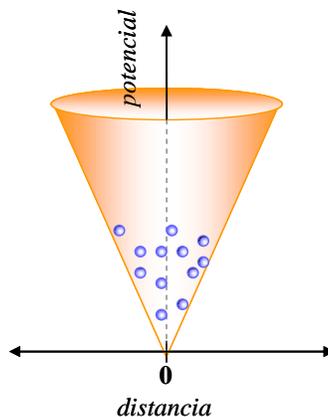


Fig. 4. Potencial en función de la distancia para una trampa magnética estática convencional. Observe que se anula en el punto central.

En su interacción con los átomos, el campo magnético “empuja” hacia el centro, a aquellos átomos con spin paralelo al campo, mientras que

átomos con spin antiparalelo son repelidos del centro (se desplazan hacia regiones donde el campo es máximo)⁵.

El potencial magnético que contiene a los átomos, mostrado en la Figura 4, posee un defecto importante: Al poseer un campo nulo en el centro, esto permite que los átomos, en este punto, cambien su spin al azar (efecto Majorana ó Majorana spin-flips). Así, muchos átomos pueden invertir su spin, de forma que sean expulsados de la trampa. Esta pérdida descontrolada de átomos, tiene una influencia negativa sobre la densidad de átomos necesaria para el BEC.

Eric Cornell solucionó este problema, añadiendo otro campo magnético, el cual rota en un plano normal al eje de simetría de la trampa inicial. El potencial resultante tendría forma parabólica, como se muestra en la Figura 5.

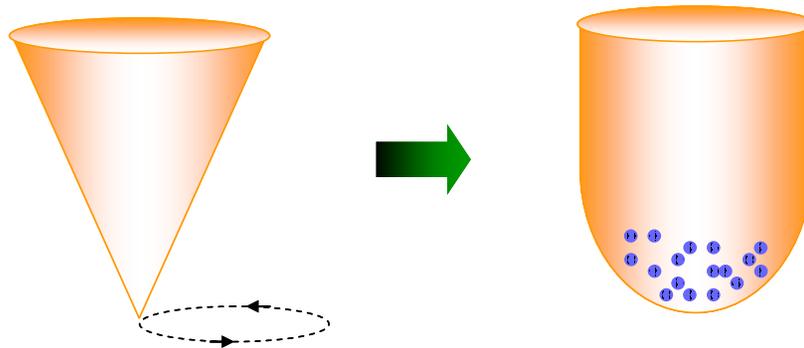


Fig. 5. Esquema de la formación de una TOP.

Esencialmente, se toma el punto central (donde el campo es cero) y se desplaza haciéndolo girar. Así, los átomos siguen atrapados en lo que se denomina “órbita de la muerte”, de manera que pueda aplicarse el enfriamiento evaporativo. Este tipo de potencial giratorio recibió el nombre de Potencial tiempo-orbital (TOP, siglas en inglés).

⁵la fuerza de “empuje” es $F = -\nabla U$, donde $U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$ es la energía potencial magnética de interacción.

b) Escalpel de radiofrecuencia (rf):

Ahora que poseemos una “taza” donde nuestros átomos están contenidos, debemos extraer los átomos más energéticos, sin reducir dramáticamente la densidad (para este momento es del orden de 10^{10} cm^{-3}).

Para hacer esto, se utiliza un “escalpel” de radio frecuencia (rf). Este escalpel consistiría en una fuente de ondas (fotones) en el orden de las radio frecuencias⁶. La frecuencia del escalpel puede ser modificada a voluntad, y es la variable independiente del experimento.

Este escalpel posee inicialmente la frecuencia exacta para cambiar la orientación de los spines de los átomos más energéticos, es decir, aquellos que se encuentran en la parte superior de la “taza” (Fig. 5) o, dicho de otro modo, aquellos átomos ubicados en las regiones donde el campo magnético es máximo.

CONDENSADO DE BOSE-EINSTEIN (BEC)

Como ya se comento, la orientación del spin, determina si el átomo es “empujado” hacia la trampa o repelido de ella. El escalpel cambiará la orientación de los spines atómicos, y “sacará” los átomos más energéticos. Conforme su frecuencia decrezca, hará “cortes” cada vez mas profundos en la nube de átomos atrapados, ya que los átomos restantes poseerán menos energía.

En la Figura 6 se muestra un grupo de fotografías de la nube de átomos para distintos valores del escalpel (ν_{evap}). A partir de estas imágenes, se pudo determinar la distribución espacial y de velocidad, y de éstas, la temperatura y densidad central de la nube.

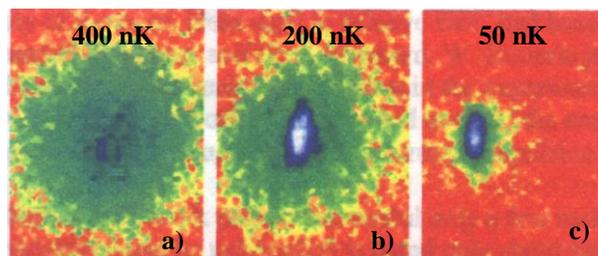


Fig 6. Nube de átomos atrapados, para distintas frecuencias del escalpel. Los colores han sido agregados para dar mayor claridad (Cortesía de Nobel e-Museum, <http://www.nobel.se/physics/laureates/2001/phyadv.pdf>)

⁶ Podría ser una antena o un campo magnético oscilante

En las diferentes imágenes de la Figura 6, se puede observar un patrón circular de átomos normales de rubidio (color amarillo y verde) uniformemente distribuidos, tal como se espera de un gas en equilibrio térmico. En la parte central de la Figura 6a, se empieza a observar regiones donde los átomos empiezan a condensarse (regiones en azul). En las Figura 6b y 6c, se hace evidente la aparición de átomos condensados (blanco) en el centro de la nube, con forma elíptica. Este mismo esquema en tres dimensiones se muestra en la Figura 7.

La evidencia experimental, muestra que la densidad del pico aumenta abruptamente a una frecuencia de $\nu_{\text{evap}} = 4,23 \text{ MHz}$ ($\approx 170 \text{ nK}$), indicando el inicio de la formación del BEC. Para una frecuencia de $4,1 \text{ MHz}$, casi todos los átomos en la trampa se encuentran en estado condensado.

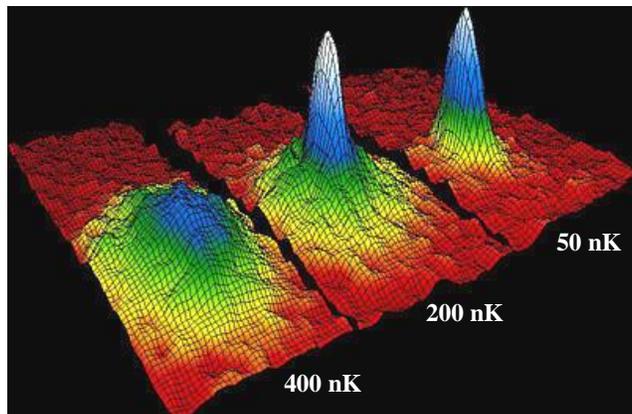


Fig 7. Esquema tridimensional de una nube de gas donde vemos de la formación del BEC (Cortesía de Nobel e-Museum, <http://www.nobel.se/physics/laureates/2001/phyadv.pdf>).

Estos son partes de los datos obtenidos por E. A. Cornell, C. E. Wiemann y su equipo, ese 5 de junio de 1995, a las 10:54 a.m., cuando observaron por primera vez el Quinto estado de la materia: El condensado de Bose-Einstein.

De ese momento en adelante, otros investigadores, que también buscaban el BEC, confirmaron la creación del mismo, reproduciendo los resultados del grupo de Boulder. Entre los primeros estaba W. Ketterle del MIT, quien pocos meses después, logró alcanzar el BEC usando átomos de sodio-23 y un sistema alternativo al TOP para contener los átomos.

CONCLUSION

Además de la posibilidad de observar macroscópicamente el comportamiento cuántico de la materia, el descubrimiento del BEC, fue considerado como un logro admirable, por lo que E. Cornell, C. E. Weimann, W. Ketterle fueron galardonados con el premio Nobel de Física (2001). Sin embargo, el trabajo recién comienza para quienes, ahora estudiarán las propiedades físicas del BEC. Se abre así, un nuevo campo de estudio para los físicos, a inicios del siglo XXI.

REFERENCIAS

Anderson, M., J. Ensher, M. Matthews, C. Wiemann & E. Cornell. 1995. "Observation of Bose-Einstein Condensation in a dilute atomic Vapor". Science 269: 198-201.

Balykin, V., V. Minogin & V. Letokhov. 2000. "Electromagnetic Trapping of Cold atoms". Rep. Prog. Phys. 66(9): 1429-1510.

BEC HomePage. 2000. <http://www.colorado.edu/physics/2000/bec/index.html>.

Cornell, E. 1996. "Very Cold Indeed: The Nanokelvin Physics of Bose-Einstein Condensation". J. Res. Inst. Stand. Technol. Vol 101, No. 4.

Ibarra-Durán, A. 2005. "Por debajo del Límite Doppler: El Enfriamiento Sísifo". Tecnociencia 7(1): 121-133.

Ketterle, W., M. Andrews, K. Davis, D. Durfee, D. Kurn, M. Mewes & N. Van Druten. 1996. "Bose-Einstein condensation of ultracold atomic gases". Publicado en: Physica Scripta, Procedente de la 15^a Conferencia General de la División de Materia Condensada de la Sociedad Física Europea.

Nobel e-Museum (www.nobel.se). 2001. "Bose-Einstein Condensation in Alkali Gases". Premio Nobel de Física 2001. Disponible en <http://www.nobel.se/physics/laureates/2001/phyadv.pdf>

Rawat, H.S. 1998. "Laser Cooling and Trapping of Neutral Atoms". Laser News 9(4). Disponible en <http://www.ila.org.in/lasernews/ln984/index.html>

Taubes, G. 1995. "Physicists Create New State of Matter". Science Vol 269: 152-153.

Recibido febrero de 2005, aceptado septiembre de 2006.