

Internet Electronic Journal*

Nanociencia et Moletrónica

Diciembre 2005, Vol. 3, N°2, pp. 563-571

CONDENSADO BOSE-EINSTEIN (BEC):

Parte 1. Historia e Investigaciones Modernas

**C. Hernández Tenorio, J. Alcántara, L. Morales, R. Peña¹,
Y. Reyes¹, V. Serkin¹, A. Zehe²**

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, ¹ Centro de Química-ICUAP
Módulo 193, Complejo de Ciencias, Ciudad Universitaria, Apdo. 1613, CP 72570

² Facultad de Ciencias de la Electrónica.

Puebla, Pue., México; Tel. + (222) 2 29 55 00, ext. 7284
e-mail: vserkin@hotmail.com

recibido: 08 Septiembre 2005

revisado: 11. Octubre 2005

publicado: 13 Dic. 2005

Citation of the article:

C. Hernández Tenorio, J. Alcántara, L. Morales, R. Peña, Y. Reyes, V. Serkin, A. Zehe, Condensado Bose-Einstein (BEC), Parte 1. Historia e Investigaciones Modernas, Internet Electrón. J. Nanocs. Moletrón. 2005, Vol. 3, N° 2. 563-571

copyright © BUAP 2005

<http://www.revista-nanociencia.ece.buap.mx>

CONDENSADO BOSE-EINSTEIN (BEC):

Parte 1. Historia e Investigaciones Modernas

C. Hernández Tenorio, J. Alcántara, L. Morales, R. Peña¹,
Y. Reyes¹, V. Serkin¹, A. Zehe²

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, ¹ Centro de Química-ICUAP
Módulo 193, Complejo de Ciencias, Ciudad Universitaria, Apdo. 1613, CP 72570

² Facultad de Ciencias de la Electrónica.
Puebla, Pue., México; Tel. + (222) 2 29 55 00, ext. 7284
e-mail: vserkin@hotmail.com

2005 Año Internacional de la Física.

Celebramos este año como el año internacional de la Física.

recibido: 08 Septiembre 2005

revisado: 11. Octubre 2005

publicado: 13 Dic. 2005

Internet Electron. J. Nanoc. Moletrón. 2005, vol.3 , No 2, pags.563-571

1. RESUMEN

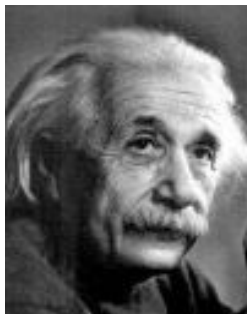
En la década de los 20's, Satyendra Nath Bose estudiaba la idea de que la luz venía en pequeños paquetes discretos (fotones), Bose asumió ciertas reglas para decidir cuándo dos fotones deberían ser contados como idénticos o diferentes. Bose tenía problemas para que la gente le creyera y publicara sus ideas en las revistas científicas, así que se las envió a Albert Einstein. A Einstein le gustaron y usó su influencia para que fueran publicadas. Es claro que Einstein no solo hizo uso de su influencia y por eso el nombre del experimento, Condensación Bose-Einstein, el hizo algo muy importante. Einstein sospechó que las mismas reglas deberían aplicarse a los átomos. El trabajó en la teoría de cómo los átomos de un gas se comportarían si estas reglas fueran aplicadas. Lo que encontró fue que las ecuaciones apuntaban a que no habría mucha diferencia, excepto a muy bajas temperaturas. Si los átomos estuvieran suficientemente fríos, algo muy poco usual debería ocurrir. Era algo tan raro que Einstein no estaba seguro de estar en lo correcto. Primero, no todos los tipos de átomos siguen las reglas para las Estadísticas de Bose, sin embargo, algunos átomos lo hacen y para ellos las predicciones de Einstein estaban correctas. Pero aún para esos tipos de átomo, él no se dio cuenta de los más importantes efectos que sus ecuaciones estaban

prediciendo. Los efectos vienen del hecho de que a muy bajas temperaturas la mayoría de los átomos están al mismo nivel cuántico. Lo que las ecuaciones de Einstein predijeron fue que a temperaturas normales los átomos estarían en muchos niveles diferentes. Sin embargo, a muy bajas temperaturas, una gran proporción de los átomos repentinamente se lanzarían hacia el nivel más bajo de energía. Los átomos que se apilan en el fondo es lo que

llamamos la Condensación de Bose-Einstein y ocurre porque ésta demostración está hecha de acuerdo con las ecuaciones de Einstein. Él no se dio cuenta de lo extraña que sería una materia con todos sus átomos en un solo nivel. Esto significa que todos los átomos son absolutamente iguales. No hay medida que pueda diferenciar uno de otro. Ahora ya no es posible diferenciar un átomo del otro. Todos están en el mismo lugar. Los átomos pueden, en efecto, estar todos en el mismo lugar, pero esto va contra todo lo que vemos a nuestro alrededor. Algunas personas han llamado a esto un "súper átomo".

2. ANTECEDENTES

Uno de los acontecimientos más importantes de la física moderna fue el descubrimiento de condensación de Bose-Einstein.



Satyendra Nath Bose y Albert Einstein

La condensación de Bose-Einstein (BEC) fue mencionada por primera vez en 1924 por Satyendra Nath Bose [1] y Albert Einstein [2] y aun es considerada como de lento desarrollo. De acuerdo con la mecánica clásica si observásemos el desarrollo y transformación de una sustancia, el enfriamiento a temperaturas conocidas, toda sustancia se cristaliza y se transforma al estado sólido. Sin embargo, a consecuencia de los efectos cuánticos, aparecen algunas excepciones de la regla clásica, en tales situaciones el helio, por ejemplo, se

mantiene líquido al cero absoluto [3, 4]. Si la temperatura alcanza el orden de 1K, aparece la superconductividad, descubierta en 1911 y los superfluidos en el ⁴He (helio 4) en 1938 [5, 6], del cual se sabe que presenta un comportamiento de superfluido perplejo, lo cual fue notado por H. Kamerling Onnes, quien recibió el Premio Nobel en física en 1913. podría ser una manifestación de la condensación bosónica de los átomos de helio. Esta sugerencia fue apoyada por el hecho de que no fue visto un efecto similar en el isotopo de ³He, el cual representa el comportamiento estadístico de Fermi-Dirac. Sin embargo, por largo



Kamerling Onnes

tiempo fue difícil conectar esto a las propiedades físicas del fluido.

Entonces en los 50's O. Penrose y L. Onsager relacionaron la

superfluidez a un rango mayor mostrado por un sistema bosónico altamente correlacionado. Esto les permitió obtener un estimado de la cantidad de átomos condensados en el líquido. Ellos encontraron solamente el 8%, lo cual se debe a las fuertes interacciones en el helio líquido, lo que desvía significativamente del gas ideal que no interactúa. La transición del superfluido ocurre a temperatura de 2.17 K, sin

embargo, parece estar relacionada con la condensación descubierta por Einstein. La teoría microscópica mostró que la superconductividad se basa en el hecho de que los electrones de espín opuesto adquieren correlaciones fuertes, lo cual los hace entrar a un estado altamente coherente, el cual es insensible a las perturbaciones, de ahí la falta de resistencia eléctrica. Como los electrones individuales obedecen a las estadísticas de Fermi-Dirac, sus pares pueden ser considerados como análogos de las partículas bosónicas y la transición de la superconductividad es similar a la condensación Bose-Einstein.

El isótopo de helio fermiónico ^3He sufre a 3mK una transición de fase análogo a la superconductividad. Semejante a la conducción de los electrones, los átomos de helio como

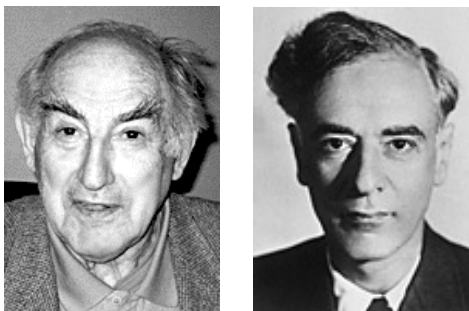


D. M. Lee, D. Osheroff y R. Richardson

las entidades bosónicas entran en un estado condensado. Esta fase fue observada por D. M. Lee, D. Osheroff y R. Richardson en 1972, cuyo descubrimiento les ameritó el Premio Nobel en física en 1996, al lograr el enfriamiento hasta el orden de milésima de kelvin lo que permitió en 1972 el superfluido del ^3He (helio 3). En el helio líquido, sin embargo, la fuerte repulsión de las partículas hace que los átomos se

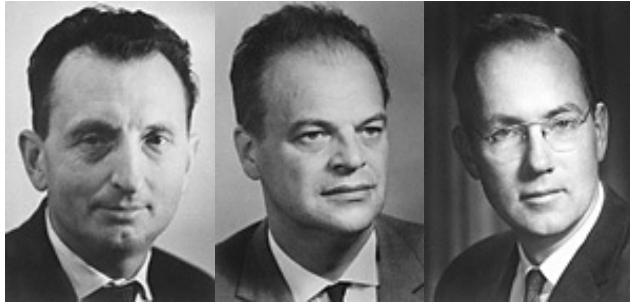
unan con una unidad del valor del momento angular total y del espín total. Esto hace a la estructura del condensado muy complicada y lleva a una amplia variedad de fases posibles.

En consecuencia el sistema muestra una multitud de fenómenos, los cuales han sido investigados extensamente. En la investigación teórica tanto el planteamiento microscópico como la teoría fenomenológica Ginzburg-Landau han sido generalizadas para proveer un buen entendimiento de la situación.



Ginzburg y Landau

3. ENFRIAMIENTO Y TRAMPA DE ESPECIES ATÓMICAS



Prokhorov, Basov y Townes

En 1964, Dr. Prokhorov, Dr. Basov y Dr. Townes [7], fueron galardonados con el Premio Nobel por la invención del láser y el máser, desarrollados con un interés científico como una herramienta poderosa para investigar los nuevos fenómenos. La alta intensidad y excelente direccionalidad del rayo láser ofreció una densidad de momento y de energía no logrado con fuentes de luz convencionales. Por lo tanto, se volvió

claro que la luz láser podría ser usada para afectar el comportamiento mecánico del movimiento atómico. La deflexión del haz atómico ha sido conocida desde Maxwell que obtuvo una expresión para la presión de la radiación de la luz y que ha sido observada experimentalmente con fuentes de luz convencional. Con los láseres se esperó que los efectos se volvieran más espectaculares. V. S. Letokhov sugirió las trampas atómicas con



Letokhov

campos electromagnéticos en 1968 [8] y en 1970 A. Ashkin sugirió que se podría aplicar la fuerza de la presión de la luz sobre un átomo en resonancia con un haz de luz y los primeros experimentos se llevaron a cabo alrededor de 1978 [9]. Durante los 70's fue obvio que las manifestaciones mecánicas de la luz láser implicarían muchos efectos físicos de interés.

un átomo que absorbe un fotón también tiene que acomodar su momento. Si las condiciones



Balykin

T. W. Hänsch y A. L. Schawlow [10] reconocieron en 1975 que la luz láser podía ser usada para enfriar átomos libres lo que abrió un nuevo dominio en la física de bajas temperaturas. Esto se debe a que son correctas, esto puede provocar que el átomo reduzca su velocidad. Una emisión espontánea subsecuente lleva a los momentos irreversiblemente en una dirección arbitraria dejando a los átomos con una velocidad disminuida en promedio, lo que provoca el enfriamiento. Mediante la utilización del desplazamiento Doppler, los átomos siempre absorben fotones que están en su misma dirección. Así una adecuada configuración del láser tridimensional puede enfriar todos los grados de libertad. En el llamado enfriamiento Doppler, el límite de energía es fijado por el proceso aleatorio de la emisión espontánea.

Los primeros experimentos exitosos de enfriamiento con láser fueron realizados por V. I. Balykin y V. S. Letokhov en Moscú y W. D. Phillips y sus colaboradores en Gaithersburg alrededor de 1980.

Las trampas de luz evolucionaron al mismo tiempo, Chu y colaboradores [11] en los laboratorios Bell atraparon átomos lentos en un campo puramente óptico. Esta trampa se llenó con átomos enfriados en una configuración láser tridimensional llamada “molasses ópticos” en donde se intersectan 6 rayos láser perpendicularmente, las temperaturas medidas en los primeros experimentos de molasses, fueron consistentes con el llamado límite-Doppler, que asciende a unos cuantos cientos de microkelvins en la mayoría de los álcalis, primero se usó la luz para sostener átomos, usando fuerzas dipolo ejercidas por un rayo láser enfocado fuertemente, sin embargo estas trampas son muy débiles y pequeñas y se necesitaron mejores trampas para acumular un número físicamente interesante de



S. Chu, C. Cohen-Tannoudji y W. D. Phillips

átomos. El grupo de Gaithersburg bajo la dirección de Phillips utilizó campos magnéticos como trampa, pero solamente una combinación de gradientes de campos magnéticos con el ajuste de Zeeman de la absorción de los fotones ofreció una trampa con suficiente eficiencia para ser una herramienta estándar para futuro trabajo. En 1987 y en 1988 hubo dos grandes avances que fueron muy importantes para desarrollar la BEC. El primero fue una trampa de fuerza

espontánea práctica, o trampa magneto-óptica (MOT originalmente fue sugerida por J. Dalibard de Paris en 1986, pero fue tomado y desarrollado por el grupo de D. E. Pritchard en colaboración con Chu) [12] y segundo, se observó que bajo ciertas condiciones, las temperaturas en los molasses ópticos son de hecho mucho más frías que en el límite Doppler [13, 14, 15].

La MOT tuvo los elementos necesarios para ser una trampa óptica muy útil: requirió cantidades relativamente modestas de potencia láser, fue mucho más profunda que las trampas dipolo y pudo capturar y contener un número relativamente más grande de átomos. Esta trampa ha sido de suma importancia para desarrollos posteriores. Combina la trampa y el enfriamiento, tiene un intervalo grande para capturar átomos, los cuales son confinados.

Los métodos experimentales altamente sofisticados desarrollados por S. Chu, C. Cohen-Tannoudji y W. D. Phillips [16, 17, 18] como enfriamiento por láser y trampas, son una herramienta para el desarrollo experimental, por estos logros fueron galardonados con el Premio Nobel de Física en 1997.

Más adelante las trampas magnéticas podían sostener y estudiar muestras por periodos más prolongados, las muestras fueron cientos de veces más frías que las anteriores, el resultado era bastante satisfactorio, en este trabajo ya se había incorporado Eric Cornell, quien se unió con su proyecto de posdoctorado en 1990.

Las trampas magnéticas y las trampas de láser fueron experimentos heroicos individualmente. La posibilidad de lograr que ambas trampas trabajaran bien en el mismo cuarto y el mismo día, era poco creíble. Sin embargo, en el primer experimento de trampa

magnética elaborado por el grupo del "Joint Institute for Laboratory Astrophysics" (JILA), las fuentes de láseres fueron simples diodos, el sistema de vacío fue una pequeña celda de cristal y la trampa magnética fue solo un alambre alrededor de ella. Este campo magnético fue adecuado para las bajas temperaturas por enfriamiento láser y para las muestras atrapadas.

Inspirados por el trabajo de espín de hidrógeno polarizado, Cornell E. A. y Wieman C. E. tuvieron la idea de trabajar con enfriamiento evaporativo para alcanzar la BEC., que fue empleada por el grupo de T. J. Greytak y D. Kleppner. Aquí el medio es enfriado para asegurar que los átomos más rápidos salgan de la trampa. La temperatura promedio de los que quedan se reduce. En una trampa de átomos, los átomos son mantenidos en un lugar por fuerzas dipolo magnéticas. La fuerza atractiva puede cambiarse a fuerza repelente si los polos magnéticos atómicos son invertidos. Esto se puede llevar a cabo con un campo de radio frecuencia, un método efectivo propuesto por D. E. Pritchard.

Gracias a este desarrollo científico se logró obtener nubes de algunos gases enrarecidos atómicos a temperaturas del orden de miliKelvin arriba del cero absoluto. Un gas enrarecido cuántico degenerado como la condensación de Bose-Einstein se obtuvo por primera vez en el año de 1995 [19-21], en esta condensación los átomos pierden sus identidades individuales y coalescen en un solo nodo, por esta razón se le ha llamado también "súper átomo". Surge entonces la superquímica, que es la emisión estimulada de especies bosónicas durante una reacción química, lo cual puede ocurrir cuando se produce un átomo o molécula, siempre y cuando se presente la condensación de Bose-Einstein. La velocidad dentro de una reacción química dentro de la BEC incrementaría proporcionalmente el número de especies producidas, contrario a la cinética química convencional. En otras palabras, la superquímica es para la química, lo que el láser es para un foco. Es una nueva área, con implicaciones importantes, este fenómeno sucede en el orden de nanoKelvins. La razón es que se requieren de muchos modos ocupados y esto solo se presenta en la BEC. Los físicos en el siglo XX y XXI se han enfocado en la no-interacción BEC, que fue predicha por Einstein. Por lo que resulta muy interesante conocer lo que sucede en la BEC con interacciones átomo-átomo. Este fenómeno va contra la intuición, no es común pensar que una reacción ocurra a estas temperaturas, así lo excluyen las leyes de Arrhenius de la cinética química. Semejante a lo que pasó con la superconductividad, la cual se pensó alguna vez, que sería imposible a bajas temperaturas. Ahora todos sabemos que grandes y nuevos fenómenos se han iniciado con superconductores y superfluidos. Ahora se abre la posibilidad de un tercer efecto a bajas temperaturas: el incremento de un proceso de

transporte químico. La superquímica está asociada a un nuevo tipo de teoría en el área cuántica, puede haber una nueva transición de fase cuántica de un nuevo tipo entre un

soliton cuántico a bajas densidades y la superquímica de altas densidades. Esto es realmente un nuevo tipo de química, que involucra la naturaleza de la onda y las correlaciones cuánticas de las posiciones de los átomos.

A partir de 1955, este dominio de investigación crece de forma intempestiva, donde participan diferentes especialistas en física atómica, en óptica cuántica y no lineal, en la física de estados condensados, etc. Por el descubrimiento de BEC en gases alcalinos



Cornell, Ketterle, Wieman

enrarecidos, el Dr. Wolfgang Ketterle del Institute of Technology en Massachussets, el Dr. Eric Cornell y el Dr. Carl Wieman de la Universidad de Colorado, obtuvieron el premio Nobel en física en el año del 2001 [22, 23], al poder mantener vapor en una trampa a temperaturas ultrafrías, con nuevos sistemas cuánticos únicos por su exactitud y métodos extremadamente sensibles para su investigación.



Diploma entregado a Eric Cornell

4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. N. Bose, Z. Phys. 1924, 26, 178
- [2] A.t Einstein, Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Phys.-Math. 1925, Bericht 3, 18
- [3] L. D. Landau and E. M. Lifchitz, *Statistical Physics*, Part 1 (Pergamon Press, Oxford, 1980).
- [4] E. M. Lifchitz and L.P. Pitaevskii, *Statistical Physics*, Part 2 (Pergamon Press, Oxford, 1980).
- [5] F. London, Nature **141**, 643 (1938)
- [6] Tisza, L., 1938, Nature (London), 141, 913
- [7] A.M.Prochorov, Quantum electronics, Nobel Lecture, December 11, 1964 en Nobel Lectures Physics, 1963-1970, pag.110, Elsevier Publishing Company, Amsterdam.

- [8] Letokhov, V., 1968, Zh. Eksp. Teor. Fiz. Pis'ma Red 7, 348
- [9] Bjorkholm, J. E., R. R. Freeman, A. Ashkin, and D. B. Pearson, 1978, Phys. Rev. Lett. **41**, 1361.
- [10] Hänsch T. W., and A. L. Schawlow, 1975. Opt. Commun. **13**, 68.
- [11] Chu, S. L., Holberg, J. E. Bjorkholm, A. Cable, and A. Ashkin, 1985, Phys. Rev. Lett. **55**, 84.
- [12] Raab, E. L., M. Prentiss, A. Cable, S. Chu, and D. E. Pritchard, 1987. Phys. Rev. Lett. **59**, 2631.
- [13] Lett, P. D., R. N. Watts, C. I. Westbrook, W. D. Phillips, P. L.
- [14] Gould, and H. J. Metcalf, 1988, Phys. Rev. Lett. **61**, 169.
- [15] Chu, S., D. S. Weiss, Y. Shevy, and P. J. Ungar, 1989, *Proceedings 11th International Conference on Atomic Physics* (World Scientific, Singapore), pp. 636–638.
- [16] Dalibard, J., and C. Cohen-Tannoudji, 1989, J. Opt. Soc. Am.B **6**, 2023.
- [17] Chu, S., 1998, Rev. Mod. Phys. **70**, 685.
- [18] Cohen-Tannoudji, C. N., 1998, Rev. Mod. Phys. **70**, 707.
- [19] Phillips, W. D., 1998, Rev. Mod. Phys. **70**, 707.
- [20] K. B. Davis, M. O. Mawes, M. R. Andrews, N. J. van Druten, D. S. Durfee, D. M. Kurn, and W. Ketterle, Phys. Rev. Lett. **75**, 3969 (1995).
- [21] M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Matthews, C. E. Wieman, and E. A. Cornell, Science, V.269, 198, 1995.
- [22] W. Ketterle, Nobel Lecture in Physics, Stokholm, 2001.
- [23] E. A. Cornell and C. E. Wieman, Nobel Lecture in Physics, Stokholm, 2001.