

Retrospectiva Histórica de la Estadística de Bose- Einstein

Mayo 2010

Física Estadística

Antonio E. Hurtado Romero

Pablo Pajuelo Cabezas

Índice

1) Introducción

- a) Satyendra Nath Bose
- b) Albert Einstein

2) Retrospectiva

- a) 1900. La Hipótesis Cuántica de Planck
- b) 1924-1925. Estadística de Bose-Einstein
- c) 1926. Fermiones y Bosones
- d) 1928-1938. De He I a He II. Superfluidez
- e) 1940. El Espín diferenciador
- f) 1948-1980s. La Carrera Hacia el Condensado de Bose-Einstein
- g) 1995. El Logro Experimental
- h) Hechos Recientes

1) Introducción

a) Satyendra Nath Bose

Satyendra Nath Bose nació en Calcuta el 1 de enero de 1894.

Bose, al terminar sus estudios elementales ingresó al Presidency College en 1909 donde se decantó por la ciencia. Durante su estancia se le concedió un B.Sc en 1913 y un M.Sc. en 1915. Fue en este año cuando se casó con Ushabala Ghosh, con la que tuvo tres hijas y dos hijos.



En 1917 comenzó a impartir clases en la University College de Calcuta. Esta universidad permitió que Bose pudiera acceder a textos recientes de teoría cuántica y relatividad que hasta entonces no podían conseguirse en India. Entre todos estos textos, el libro “On stational mechanics” de Gibbs estimuló el interés de Bose por la estadística, lo que le llevó a estudiar los trabajos de Einstein e incluso su permiso para traducirlos y publicarlos en India.

Desde 1921 a 1945 Bose impartió clases en la Universidad de Dacca donde fue jefe del departamento de física desde 1927. Fue durante este periodo en el que envió a Einstein un artículo titulado “Planck’s Law and the Hypothesis of Light Quanta” (1924), donde dedujo la ley de Planck a partir de proponer diferentes estados para un fotón, algo con lo que Einstein quedó impresionado. Es así como, por el lento correo de aquella época, se produjo el acercamiento entre estos dos científicos. Se reunieron por primera vez en Berlín en 1925.

Bose contribuyó de manera sustantiva al desarrollo de la mecánica estadística y la denominación general de "bosones" para las partículas de espín entero la acuñó Dirac precisamente en honor de este físico indio. La estadística cuántica que se aplica a estas partículas recibe el nombre de "estadística de Bose-Einstein".

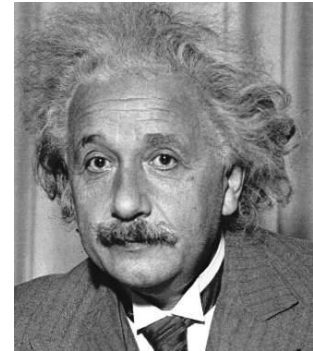
Finalmente Bose regresó a trabajar como físico a su natal Calcuta a partir de 1945, poco antes de que India lograra la independencia. Durante esta etapa final de su carrera, Bose fue objeto de diversos honores y recibió prestigiosas

distinciones entre las que destaca su incorporación a la Royal Society of London en 1958.

Bose falleció en su Calcuta natal, a la edad de 80 años, el 4 de febrero de 1974.

b) Albert Einstein

Albert Einstein nació en Ulm, una pequeña ciudad del Reino de Württemberg en Alemania en 1879. Durante su etapa escolar, más concretamente a partir de 1889 Max Talmund, un estudiante de medicina polaco, introdujo a Einstein varios textos importantes de ciencia, matemáticas y filosofía.



En 1884, debido a dificultades económicas se trasladó con su familia a Milán. Dos años después comenzaría sus estudios superiores en la Eidgenössische Technische Hochschule de Zurich.

Desde 1902, hasta 1909 trabajó en la oficina de patentes de Berna. Durante este periodo se casó con Mileva Maric y tuvo dos hijos. En 1919 se divorciaron y Einstein se casó con su prima Elsa.

En 1905 publicó cinco trabajos en los Annalen der Physik lo que le valió para conseguir el grado de doctor por la Universidad de Zurich. Estos trabajos consistían en el movimiento Browniano (Por el cual se le concedió el premio Nobel en 1921), el efecto fotoeléctrico y la relatividad, en la que trabajó los años siguientes.

En 1924, Einstein recibe el artículo de Bose sobre la derivación de la ley de Planck, resultados que aplicó también a los fotones. Entre los trabajos que escribió destaca la presentación del condensado de Bose-Einstein.

Con la llegada al poder de Hitler en 1933, Einstein se vio obligado a migrar a Estados Unidos donde pasó sus últimos 25 años en el Instituto de Estudios Superiores de Princeton, ciudad en la que murió en 1955.

2) Retrospectiva

a) 1900. Hipótesis Cuántica de Planck.

En 1900, Planck establece que la energía se irradia en pequeñas unidades a las que denomina cuantos. Se encuentra de este modo una relación entre la energía de un fotón y la frecuencia de radiación:

$$E = \hbar\omega$$

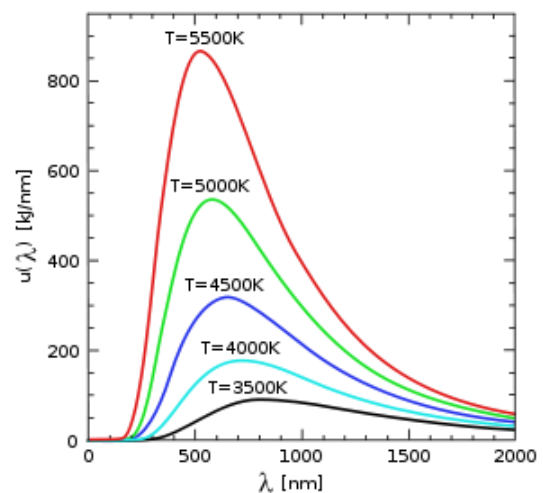
La constante \hbar , se denomina constante de Planck.

Esta primera formulación cuántica de un fenómeno natural se dio a conocer en diciembre de ese año, en una sesión de la Sociedad Física de la Academia de Ciencias de Berlín.

b) 1924-1925. El Artículo de Nath Bose

Planck obtuvo a principios de siglo una expresión para describir la intensidad de la radiación emitida por un cuerpo negro a una temperatura T mediante uso de la electrodinámica clásica:

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$



En este año, Nath Bose demostró sin necesidad de la física clásica la ley de Planck, un trabajo que se negaron a publicar en varias ocasiones. Estas negativas le convencieron para presentar su trabajo a Einstein, que quedó asombrado por el novedoso método. Método que utilizó para demostrar la existencia de un estado

simétrico mecano-cuántico, además de ser punto de partida para entender la existencia de estados coherentes y al desarrollo del láser.

Además, Einstein amplió en 1925 el formalismo de Bose para partículas no materiales que ahora llamamos bosones, en un artículo bajo el nombre de “Teoría Cuántica del Gas Ideal Monoatómico”. Surgiendo así la estadística de Bose-Einstein:

$$n_i = \frac{g_i}{e^{(\varepsilon_i - \mu)/kT} - 1}$$

Cuyo predicción más conocida es la del condensado de Bose-Einstein, un estado de la materia en el cual todas las partículas se encontraban en su estado fundamental.

c) 1926. Fermiones y Bosones

En este año, Paul Dirac, desarrolló una versión de la mecánica cuántica en la que unía los trabajos de Heissenberg y Schrödinger en un modelo único, dándose cuenta de que funciones de onda simétrica identificaban a los bosones, mientras que las antisimétricas hacían lo propio para fermiones. Junto a él, Enrico Fermi elaboró y publicó la denominada Estadística de Fermi-Dirac.

d) 1928-1938. Del He I a He II.

Willem Hendrik Keesom (físico holandés) descubrió, en 1926, como solidificar el helio. Poco antes, en 1908, su maestro Heike Kamerlingh Onnes había conseguido licuarlo.

Kamerlingh Onnes recibió el Premio Nobel en 1913 por estos trabajos acerca de las propiedades físicas de la materia a bajas temperaturas, sobre todo del helio, y el descubrimiento de la superconductividad, un fenómeno que también se da a temperaturas cercanas al cero absoluto.

En 1938, el físico ruso Pyotr Kapitsa realizó una serie de experimentos para estudiar el helio líquido, lo que condujo al descubrimiento de su superfluidez (no

confundir con superconductividad). Kapitsa publicó numerosos informes sobre las propiedades de este nuevo estado de la materia en una serie de artículos, trabajo por el cual recibió el Premio Nobel de Física en 1978.

Breve descripción de propiedades del Helio entorno a su punto lambda

Helio I

Es una fase del isótopo helio-4 que, térmicamente, se encuentra por debajo de su punto de ebullición de 4,22 K, y por encima del punto lambda de 2,17 K, en un estado normal de líquido incoloro. Al igual que otros líquidos criogénicos, el helio I hierve cuando se calienta y se contrae cuando baja su temperatura. Por debajo del punto lambda, sin embargo, esta fase no hierve y se expande a medida que la temperatura desciende.

Tiene una viscosidad muy baja y una densidad de 0,14 g/mL, que es sólo una cuarta parte del valor predicho por la física clásica. Es necesario hacer uso de la mecánica cuántica para explicar esta propiedad y, por tanto, ambos tipos de helio líquido se llaman *fluidos cuánticos*, lo que significa que muestran propiedades atómicas a escala macroscópica. Esto puede ser un efecto del hecho de que su punto de ebullición está muy cerca del cero absoluto, lo que impide que la energía cinética molecular oculte sus propiedades atómicas.

Helio II

El helio II es la fase líquida que se encuentra por debajo de su punto lambda y muestra unas características sumamente inusuales. Por ejemplo, la ebullición del helio II no es posible debido a su alta conductividad térmica; la entrada de calor causa la evaporación directa del líquido a gas.

El helio II es un superfluido, un estado cuántico de la materia con propiedades extrañas. Por ejemplo, cuando fluye a través de capilares del orden de 10^{-7} a 10^{-8} m, no tiene viscosidad medible. Sin embargo, cuando se realizan mediciones entre dos discos en movimiento, se observa una viscosidad comparable a la

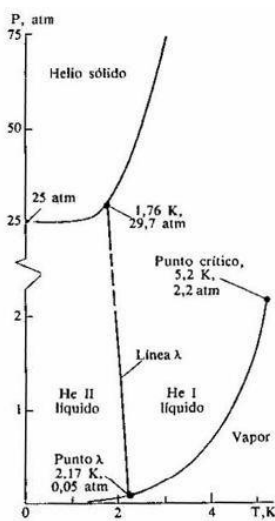
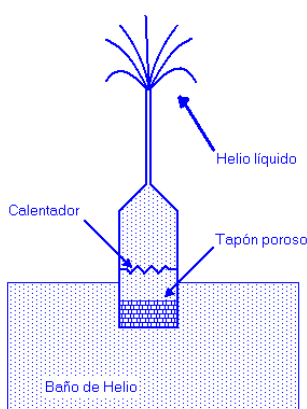


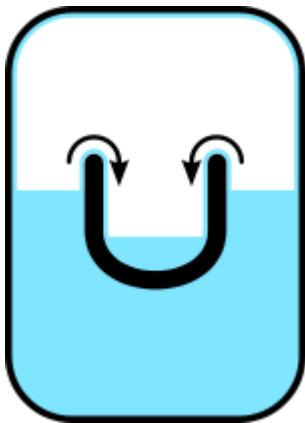
Diagrama de fases del helio líquido



ado Romero abejas

del helio gaseoso. La teoría actual explica este fenómeno utilizando un *modelo de dos fluidos* para el helio II. En este modelo, el helio líquido por debajo del punto lambda se considera que contiene una proporción de átomos de helio en estado fundamental, que componen el superfluido, y que fluyen con una viscosidad exactamente igual a cero; y una proporción de átomos de helio en un estado excitado, que se comportan más como un fluido ordinario.

El helio II también presenta un efecto de ascensión. Cuando una superficie se extiende más allá del nivel de helio II, éste se mueve a lo largo de la superficie, contra la fuerza de gravedad. El líquido se escapará de un contenedor que no esté sellado “trepando” por las paredes del mismo hasta que encuentre una región con mayor temperatura donde se evaporará. Este ascenso lo realiza en una película de 30 nm de espesor, independientemente del material de superficie. Esta película se llama película de Rollin en honor a Bernard V. Rollin, la primera persona que caracterizó este rasgo. Como resultado de este comportamiento y de la habilidad del helio II de escapar a través de aberturas pequeñas, es muy difícil mantener a este fluido confinado.



Ascensión en el helio II

La conductividad térmica del helio II es mayor que la de cualquier otra sustancia conocida. Es un millón de veces mayor que la del helio I y varios cientos de veces la del cobre. El flujo de calor se rige por ecuaciones similares a la ecuación de onda utilizada para caracterizar la propagación del sonido en el aire. Cuando se introduce calor, éste se mueve a través de helio II en forma de ondas a 20 metros por segundo a una temperatura de 1,8 K. Este fenómeno es conocido como segundo sonido.

e) 1940. El Espín diferenciador

En un artículo, publicado por el físico austriaco Wolfgang Ernst Pauli en 1940 en la American Physical Society, se concluía a partir de la invariancia relativista de la ecuación de onda para partículas libres que: del primer postulado, según el cual

la energía debe ser positiva, necesariamente las estadísticas de Fermi-Dirac habían de aplicarse a partículas con espín arbitrario semientero; del segundo postulado, según el cual los observables en diferentes puntos del espacio-tiempo son permutables, las estadísticas de Bose-Einstein habían de aplicarse a partículas con espín entero arbitrario.

f) La carrera hacia el Condensado de Bose-Einstein

-1948- Teoría microscópica del gas de Bose

Paralelamente a la carrera experimental, el grupo internacional de físicos Gross, Pitaevskii, Bogoliubov y Ginzburg-Landau formularon, en los años cincuenta, una serie de teorías generales sobre los condensados atómicos que sirvieron de base para comprender fenómenos como la superfluidez o superconductividad, sistemas de condensados más complejos al existir interacciones y ya observados por formarse a temperaturas superiores que los condensados de un gas.

Estas teorías relacionaban directamente la condensación predicha por las estadísticas de Bose-Einstein con los fenómenos de superfluidez observados experimentalmente.

-1956- Estimación de la fracción de condensado B-E para el He-4

En 1956, el matemático británico Oliver Penrose y el físico de origen noruego Lars Onsager publicaron un artículo donde proponían una explicación teórica a la superfluidez del helio. Basándose en la hipótesis de que no hay “orden configuracional de largo alcance” los estudios indicaban que la fase líquida helio II mostraba características de condensación Bose-Einstein. De esta condensación se podía sacar una estimación aproximada que indicaba que alrededor de un 8% de los átomos eran “condensados”. Y por el contrario, se mostraba por qué uno no esperaría condensación B-E en un sólido. Para temperaturas finitas se aplica la teoría de Feynman de la transición lambda: las aproximaciones de Feynman dan a entender que este criterio de condensación B-E se satisface por debajo de la transición lambda, pero no por encima de ella.

Dos años antes el físico estadounidense Richard Feynman había descrito las mismas conclusiones, de las cuales Onsager no tenía conocimiento.

-1957- Teoría BCS de la superconductividad

La Teoría BCS, que recibe su nombre de las iniciales de los físicos que la idearon: John Bardeen, Leon Cooper, y John Robert Schrieffer, fue propuesta en julio de 1957 intentando explicar el fenómeno de la superconductividad.

Esta teoría está considerada como la teoría más importante en el campo de la superconductividad desde el punto de vista microscópico, es decir, tratando de explicar las propiedades de los superconductores a partir de primeros principios. Sin embargo gran parte de los superconductores siguen sin contar con una explicación satisfactoria.

En 1972 los tres científicos recibieron el Premio Nobel de Física gracias sus trabajos en este campo.

-1966- Fracción de condensado B-E experimental. Un fracaso

En 1966 los físicos P. C. Hohenberg y P. M. Platzman trataron de hallar experimentalmente la fracción de condensado estimada por Penrose y Onsager mediante la utilización neutrones de alta energía para sondear la distribución de los impulsos de los átomos de helio líquido. Trataron de detectar la presencia de un momento cero de condensación por debajo de la temperatura lambda.

Lamentablemente los resultados que obtuvieron no fueron concluyentes.

-1972- Condensación de parejas bosónicas del He-3 fermiónico

La teoría BCS fue un tremendo éxito en la descripción de los superconductores. Poco después de la publicación de la Teoría BCS, los teóricos propusieron que un podría ocurrir un fenómeno similar en fluidos formados por fermiones distintos a los electrones, como son los átomos de helio-3.

Estas especulaciones fueron confirmadas en 1971, cuando los experimentos realizados por Douglas D. Osheroff mostraron que el helio-3 se convierte en un superfluido por debajo de 0,0025 K. Se demostró poco después que la superfluidez del helio-3 se debe a un mecanismo similar al BCS.

La teoría de la superfluidez del helio-3 es un poco más complicada que la teoría BCS de la superconductividad. Estas complicaciones surgen porque los átomos de helio se repelen entre sí con mucha más fuerza que los electrones, pero la idea básica es la misma.

-1980s- Las técnicas de enfriamiento atómico

En la década de los '80 se desarrollaron los principales procedimientos experimentales para disminuir la energía de los átomos en las proximidades del cero absoluto. Las dos técnicas principales fueron:

- El **enfriamiento por láser**, que son las técnicas en que se toman muestras de átomos y moléculas y se enfrían a través de la interacción de uno o más campos de luz láser. El primer ejemplo de enfriamiento por láser, y también sigue siendo el método más común de enfriamiento por láser es el enfriamiento Doppler o comúnmente llamado “láser de refrigeración”.

- La **trampa atómica** o **trampa magnética** es un dispositivo que utiliza un campo magnético para atrapar neutrones mediante un momento magnético.

g) El logro experimental

-1995- Primer Condensado de Bose-Einstein experimental

Hasta la fecha el concepto de condensado de Bose Einstein se había dejado de lado pero, en 1995, los físicos estadounidenses Eric A. Cornell y Carl E. Wieman lo resucitaron milagrosamente logrando, por primera vez, enfriar átomos al más bajo nivel de energía, menos de una millonésima de Kelvin por encima del Cero absoluto, una temperatura muy inferior a la mínima temperatura encontrada en el espacio exterior. Utilizaron el método de enfriamiento por láser, haciendo



Wieman (izda.) y Cornell (dcha.)

que la luz rebote en los átomos con más energía que su impacto sobre los mismos. Cuando los fotones rebotan en el átomo, el electrón del átomo que absorbe el fotón salta a un nivel superior de energía y rápidamente salta de regreso a su nivel original, expulsando el fotón de nuevo, logrando el descenso de su temperatura.

Para que ello suceda se necesita la frecuencia exacta de láser según el tipo de átomo a enfriar. Finalmente, la sustancia se enfría aún más con la evaporación magnética de los átomos con más energía. Consiste en dejar escapar del confinamiento magnético a los átomos más energéticos, que al hacerlo se llevan consigo más energía de la que le corresponde, logrando así dejar dentro lo de más baja temperatura.

En 2001 Cornell y Wieman recibieron el Premio Nobel de Física por su increíble logro.

h) Hechos Recientes

En 1999 se considera al Condensado Bose-Einstein como un nuevo estado de agregación de la materia. Tras el experimento de Cornell y Wieman los logros en este campo aumentan casi exponencialmente, habiéndose conseguido, por ejemplo:

En 1999: Condensado ajustable (tunable); Ondas de masa coherente; Estimulación bosónica; Interacción no lineal entre materia y onda; BEC en trampa óptica; Resonancia Feshback

En 2003: Composición de bosones; Encuentros próximos

En 2004: Solapamiento BEC y BCS en sistemas fermiónicos; BEC molecular; Ondas gravitacionales; BEC en microchip

3) Bibliografía

Algunas de las páginas web consultadas:

- www.biografiasyvidas.com
- www.iloveindia.com/indian-heroes/satyendra-nath-bose.html
- <http://jila.colorado.edu/pubs/thesis/haljan/ch1.pdf>
- <http://cerncourier.com/cws/article/cern/28552>
- Wikipedia

Libros y artículos:

- Adkins. Termodinámica del equilibrio
- Kumar, N. Bose-Einstein Condensation: Where many become one and, therefore, there is plenty of room at the bottom.