

El mensaje que cambió la Física hace 100 años

En junio de 1924, en la Universidad de Berlín, Albert Einstein recibió una carta por parte de un físico de India. Aun siendo un completo desconocido para el popular científico, el físico Satyendra Nath Bose quería conocer la opinión directa de Einstein sobre un artículo adjunto en dicha carta. Compuesto por 5 páginas, la publicación demostraba solucionar un pequeño error dentro de la teoría de la Física Cuántica por el cual Einstein había dedicado tiempo incesablemente. Bose había derivado exitosamente la Ley de Planck, la cual describe el espectro de radiación de un cuerpo negro. Escrita por primera vez por Max Planck en 1900, dicta que la radiación no se dispara hasta infinito en longitudes de onda infinitesimales como sugiere la Física Clásica, sino que surgen picos de intensidad hasta minimizarse. Pero, ¿cuál es la historia detrás de este hito y cuáles fueron sus consecuencias?

Ideas oprimidas

Bose nació el 1 de Enero de 1894 en Calcuta (actualmente Kolkata) en la provincia de Bengala, regida por la ocupación de Inglaterra, dentro de un entorno cultural y educativo conocido como “Renacimiento de Bengala”¹, mezcla de la influencia vanguardista europea y las corrientes hinduistas. Alrededor de 1905, debido a las revueltas rebeldes en Bengala, el imperio británico decidió dividir el estado en dos partes, hecho que influyó a Bose a estudiar con la finalidad de escapar del dominio británico. El ilustre científico asistió al Presidency College con su amigo y futuro astrofísico Meghand Saha², expulsado de la escuela por su involucración en el movimiento Swadeshi [1].

Ambos físicos se aliaron en contra de las autoridades británicas y no querían contribuir en áreas con potenciales aplicaciones reales como Física aplicada o Química. Por ello, dedicaron su vida a las ramas matemáticas y teóricas de la Física, particularmente en una novedosa teoría desarrollada en aquel entonces en la Física alemana: la Física Cuántica. Gracias a su dedicación en la materia, se adaptaron al concepto del fotón, entendiendo la luz como un objeto discontinuo. En contraposición, los físicos británicos se guiaban por la naturaleza continua redactada en las Ecuaciones de Maxwell [2].

Tanto Bose como Saha se licenciaron en Física en la Universidad de Calcuta; sin embargo, a causa del aislamiento de la región y las consecuencias de la Primera Guerra Mundial, estar al día de las novedades en Europa era tedioso. En la Librería Presidencial, “Philosophical Magazine” [3] era casi la única revista actualizada periódicamente. Ahí fue donde Bose y Saha se informaron acerca del Modelo atómico de Bohr, publicado en 1913 [4].

¹ Antes de 1830 y antes que ninguna otra ciudad asiática, Calcuta ya contaba con un sistema escolar que utilizaba métodos de instrucción y libros de texto europeos. Por iniciativa propia, la élite urbana había fundado el Hindu College, la única institución de enseñanza superior de estilo europeo en Asia.

² Meghnad Saha fue un astrofísico indio responsable de la teoría de ionización térmica. Gracias a la Ecuación de Saha, es posible deducir la clase espectral de las estrellas en base a su temperatura



Figuras importantes de la Universidad de Calcuta [1], de izquierda a derecha levantados, Snehamoy Dutt, Satyendra Nath Bose, Debendra Mohan Bose, N R Sen, Jnanendra Nath Mukherjee y N C Nag. Sentados, Meghnad Saha, Jagadish Chandra Bose, Jnan Chandra Ghosh

Afortunadamente, un botánico alemán llamado Paul Johannes Brühl [5] visitaba ocasionalmente la universidad, transportando consigo libros y revistas relacionadas principalmente con Termodinámica, Cuántica y Relatividad. En 1919, tras la atención mediática en Einstein sobre la confirmación de la Relatividad General, Bose y Saha consiguieron ejemplares de los artículos fundamentales en alemán y francés [6]. Dado que Bose conocía con fluidez los idiomas junto con el inglés, fue capaz de publicar las transcripciones en el libro “The Principle of Relativity” (1920), la primera colección en inglés sobre esta temática [7].

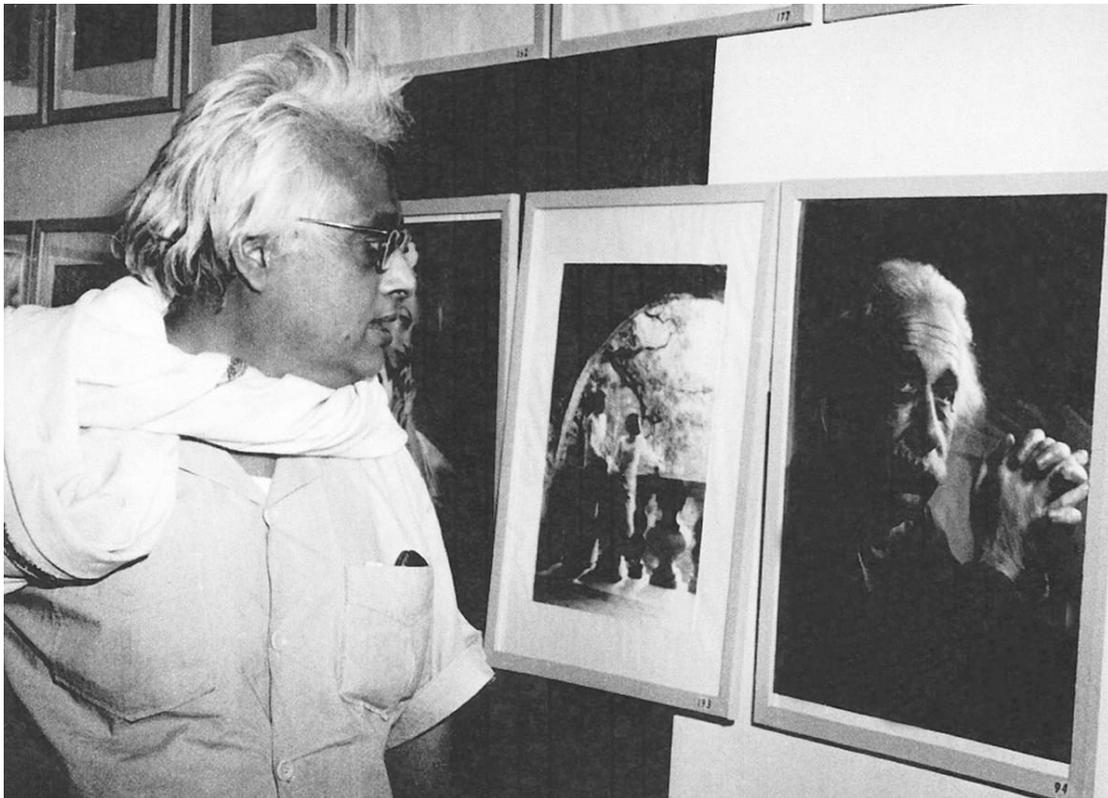
Un año más tarde, Bose recibió una oferta de profesorado en la recién Universidad de Dacca, encargado del desarrollo del departamento de Física. Dos años más tarde, debido a problemas económicos, se paralizó la expansión y Bose incluso tuvo que esforzarse por mantener su puesto. De esta forma, en 1923, Bose se hallaba en un estado de incertidumbre intelectual en un estado políticamente inestable.

“¿Einstein, qué opinas?”

A pesar de los problemas, el físico treintañero continuaba con sus estudios. Se percató de un punto preocupante: la derivación de la Ley de Planck no tenía una lógica adecuada ya que mezclaba conceptos clásicos y cuánticos. Bose decidió ignorar la teoría clásica y derivar la ley desde primeros principios cuánticos: considerar el movimiento de un gas de fotones discretos. Esta idea quedó plasmada en otoño de 1923 en el artículo de referencia titulado “Planck’s law and the light-quantum hypothesis” [8].

Tal y como empieza el artículo, la ley de Planck es el punto de partida de la Física Cuántica, aunque un paso crucial en la derivación requiere asumir grados de libertad clásicos. Según Bose, “esto es una propiedad que no se satisface en todas las derivaciones”; aunque aprueba el intento de derivación de Einstein desde el punto de vista clásico y “extraordinariamente elegante”, él sentía que no estaba “suficientemente justificado desde un punto de vista lógico”. Con firmeza, Bose prosigue: “Sucesivamente, realizo un esquema breve del método”. Tres páginas de rigurosas derivaciones más tarde, culmina con la ecuación acerca de la distribución de energía de radiación de un cuerpo negro. Esta ecuación, en palabras de Bose, es “la misma de la fórmula de Planck”.

En un artículo redactado por la física Partha Ghose [9], una de las últimas estudiantes de doctorado de Bose, explica que su método insinuaba implícitamente que los fotones son indistinguibles. Se define el volumen de fotones como un espacio compuesto de estados (bautizados celdas) con el número total equivalente al número de posibles configuraciones de los fotones. Dado que el gas de fotones tiene una densidad fija, intercambiar fotones individuales no genera nuevas celdas, sugiriendo que los fotones no pueden ser “etiquetados” y observar su movimiento.



Cuando su publicación fue rechazada en 1924, Bose decide enviar una carta a Einstein para conocer su opinión. Inmediatamente después, asombrado por los resultados, decide publicar el artículo “Zeitschrift für Physik”. Inexplicablemente, no existen fotografías de Bose y Einstein juntos [1]

A principios de 1924, Bose envió el artículo a Philosophical Magazine, abierta a físicos indios, sin recibir ninguna respuesta. Desilusionado aunque convencido en sí mismo, envía por correo una copia revisada a Einstein, quien lo recibe el 4 de junio de 1924.

$$\rho(E) = g_s \frac{(2\pi V)}{h^3} (2m)^{3/2} \sqrt{E}$$

“Un avance importante”

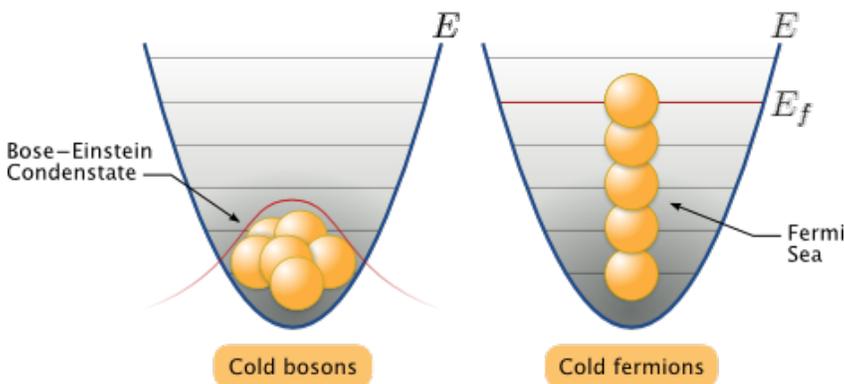
Einstein probablemente estaba igual de sorprendido del trabajo de Bose que el propio Bose. Conocía la inconsistencia de la suposición clásica en la derivación cuántica y había intentado en numerosas ocasiones removerla. El 2 de julio del mismo año, Einstein respondió por escrito a Bose nombrando a su artículo como un avance importante (“an important step forward”). Einstein decide traducir el artículo y enviarlo a “Zeitschrift für Physik”. Con la aprobación de Einstein, el artículo de Bose fue aceptado y publicado en la revista de agosto 1924 [10].

Bose había considerado los fotones como partículas independientes, insinuando la posibilidad de interferencias de ondas. Einstein no se había fijado que este hecho no solo era aplicable a fotones sino también a otras partículas. De hecho, en la actualidad, sabemos que la interferencia solamente ocurre en partículas con valor de spin entero, o como diría Paul Dirac décadas más tarde, “bosones”³.

Tras el artículo de Bose, Einstein redacta un artículo en alemán titulado “Quantentheorie des einatomigen idealen Gases”, en español, “Teoría Cuántica de gases monoatómicos ideales” publicado en “Proceedings of the Prussian Academy of Sciences” en enero de 1925 [11]. Ahí, Einstein describe “una relación formal de gran alcance entre radiación y gas”; en palabras más científicas, demuestra que a temperaturas cercanas al cero absoluto, la entropía del sistema desaparece y todas las partículas residen en el mismo estado o “celda”. La distribución de entropía “muestra indirectamente una hipótesis cierta acerca de la interacción entre moléculas, que sigue siendo de naturaleza misteriosa”.

Einstein atribuye esta influencia a la interferencia entre partículas. Según predijo, a temperaturas bajas, la naturaleza ondulatoria de los gases sería más visible hasta el punto que la viscosidad disminuye rápidamente: superfluido. Asumiendo en tratar por igual la radiación y los gases, Einstein se fundamentó en los estudios de Bose para predecir un nuevo y desconocido estado de la materia.

Gracias a la atención de Einstein sobre el trabajo de Bose, éste fue invitado para estudiar alrededor de Europa con Langevin y también en el laboratorio de Maurice le Broglie [1]. Viajando por primera vez a París en otoño de 1924, donde escribió otra carta más a Einstein, se dispuso a hablar en persona con Einstein en Berlín en 1926. Sin embargo, este dúo dejó de colaborar: Einstein se opuso a la fórmula de probabilidad de estados de Bose en un campo de radiación y Bose, ocupado en otros temas, no volvió a indagar en esta cuestión particular.



Representación visual de la diferencia entre bosones y fermiones a baja temperatura: mientras que los fermiones se organizan en los niveles atómicos según la Regla de Fermi, los bosones se acumulan en el mínimo de energía [12]

³ Los bosones, por ejemplo los fotones, tienen un número cuántico de spin entero ($S \in \mathbb{N}$) en contraposición a los fermiones, como los electrones o muones. Los bosones son responsables de las interacciones fundamentales dentro del marco del Modelo Estándar.

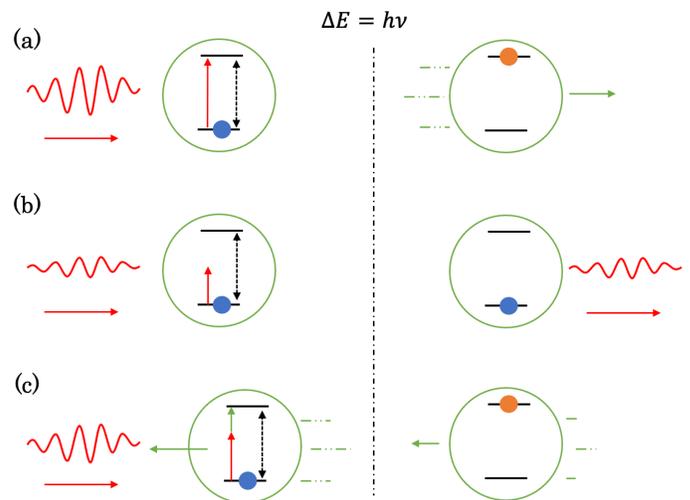
“¿Hasta qué punto es importante?”

Para alcanzar temperaturas cercanas a 0K, se requirió de un desarrollo experimental imprescindible. Uno de los mayores inventos derivados de la búsqueda de esta hipótesis fue el enfriamiento láser. Sin indagar mucho en el trasfondo matemático, el funcionamiento se puede explicar mediante tres situaciones [13].

(a) Un átomo en reposo puede absorber un fotón de un láser cuya frecuencia se iguale a la diferencia de energía entre dos estados de sus electrones. El átomo adquiere el momento del fotón, “empujando” el sistema en la dirección del fotón.

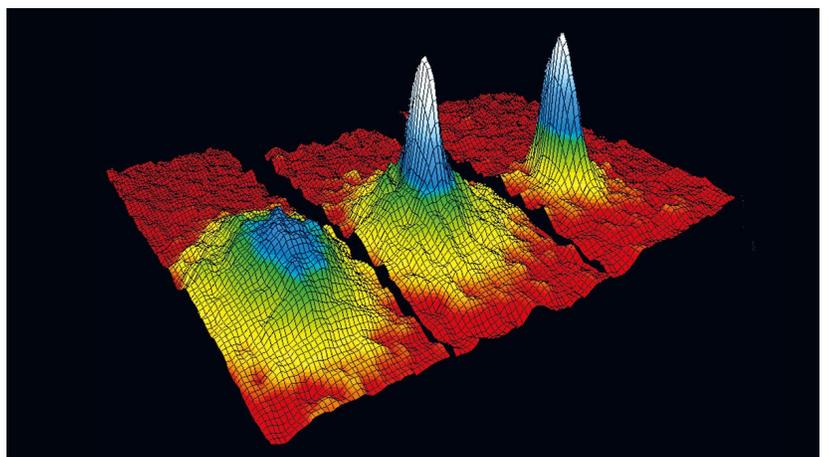
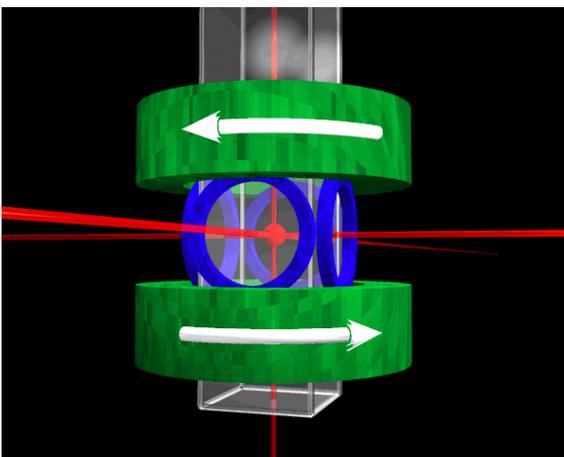
(b) Cuando el láser se configura por debajo de esta diferencia de energía, el átomo no absorbe el fotón y el sistema no cambia su movimiento

(c) Si la frecuencia del láser es muy baja para ser absorbido pero el átomo se mueve en dirección contraria, debido al Efecto Doppler, los niveles del átomo se encuentran desplazados tal que la frecuencia es absorbida. El momento resultante reduce la velocidad del átomo, generando frío en el sistema



Basándose en esta idea, 70 años más tarde de la hipótesis, en 1995, el Condensado de Bose-Einstein fue demostrado experimentalmente por dos laboratorios estadounidenses. El experimento más famoso fue realizado por Carl Wieman, Eric Cornell y sus colaboradores [14], el sistema experimental se muestra en la Figura (#). Una muestra de átomos ^{87}Rb se enfrió mediante una trampa magnetoóptica. Posteriormente, se introdujo la muestra en una trampa magnética y enfriado más por evaporación. Se forma el condensado en el rango de nanoKelvins y se retira la trampa permitiendo que el condensado se expanda. Mediante la iluminación láser, se registra digitalmente la sombra de la nube formada.

Cornell y Wieman desde Colorado, junto con Ketterle del MIT, recibieron el Premio Nobel de Física 2001 "por el logro de la condensación de Bose-Einstein en gases diluidos de átomos alcalinos, y por los primeros estudios fundamentales de las propiedades de los condensados"



En esta imagen icónica realizada en el verano de 1995 en el laboratorio de NIST, el condensado de Bose-Einstein emerge de una nube de átomos de Rubidio [14]. El “pico” en la densidad de átomos en el centro indica que varios átomos están ocupando el mismo estado cuántico, principio fundamental del Condensado de Bose-Einstein.

“Muy importante”

Tras finalizar su estancia en Berlín en 1926, Bose recibió una carta de un amigo sugiriéndole solicitar una plaza de profesor en su universidad natal y, como no tenía el doctorado, le pidió una carta de recomendación a Einstein. Él se sorprendió ya que los méritos del propio Bose eran más que suficientes para recibir ese puesto, pero accedió a escribir la carta. A pesar de ello, la plaza fue ocupada por Debendra Mohan Bose (quien, curiosamente, no tenía ningún parentesco con Satyendra Nath Bose) pero renunció al puesto y se concedió finalmente a (Satyendra) Bose.

Al regresar a Dhaka, Bose se dedicó a la rutina diaria de dar clases, supervisar estudiantes y administrar el departamento de Física. Tal vez esa fuera la razón por la cual no retomó la investigación, en su lugar saltaba de un problema en otro, ya fuera burocrático o científico. Satyendra Nath Bose murió a los 80 años en Kolkata. Durante su vida, recibió múltiples honores y su legado se mantendrá siempre no exclusivamente por definir la idea principal de la Estadística de Bose-Einstein, sino también por la motivación generada por su esfuerzo para descubrir nuevas piezas de la Física.

Referencias

- [1] S N Bose National Centre for Basic Sciences, Prof. S N Bose Archive, <https://www.bose.res.in/Prof.S.N.Bose-Archive/>
- [2] James Clerk Maxwell, "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 155, 459–512 (1865)).
- [3] *Philosophical Magazine*, <https://www.tandfonline.com/journals/tphm20>
- [4] N. Bohr Dr. phil. (1913) I. On the constitution of atoms and molecules, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 26:151, 1-25, DOI: 10.1080/14786441308634955
- [5] Biswas, Kalipada (1935). "Obituary: Paul Brühl (1855-1935)". *Current Science*. 4 (4): 231.
- [6] Virendra Singh, “Albert Einstein: His Annus Mirabilis 1905” (2007), *Popular Physics*, <https://arxiv.org/abs/physics/0701240>
- [7] A. Einstein, Hermann Minkowski, Traducción “The Principle of Relativity” por Satyendra Nath Bose (1920), *Calcuta University*
- [8] Bose, S. Planck’s law and the light quantum hypothesis. *J. Astrophys. Astr.* 15, 3–7 (1994). <https://doi.org/10.1007/BF03010400> (publicación posterior)
- [9] Partha Ghose, “The Story of Bose, Photon Spin and Indistinguishability (2023)”, *History and Philosophy of Physics*, <https://arxiv.org/abs/2308.01909>
- [10] Bose Plancks Gesetz und Lichtquantenhypothese. *Z. Physik* 26, 178–181 (1924). <https://doi.org/10.1007/BF01327326>
- [11] Einstein, A. (2005). Quantentheorie des einatomigen idealen Gases. In *Albert Einstein: Akademie-Vorträge*, D. Simon (Ed.). <https://doi.org/10.1002/3527608958.ch27>
- [12] HyperPhysics, Spin Classification, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Particles/spinc.html>
- [13] HyperPhysics, Laser Cooling, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/optmod/lascool.html>
- [14] Anderson MH, Ensher JR, Matthews MR, Wieman CE, Cornell EA. Observation of bose-einstein condensation in a dilute atomic vapor. *Science*. 1995 Jul 14;269(5221):198-201. doi: 10.1126/science.269.5221.198. PMID: 17789847