

# Sincronía Atómica: El condensado de Bose-Einstein como triunfo de la estadística bosónica sobre el Principio de Pauli

Álvaro González Martínez

**Resumen**— Este trabajo explica el condensado de Bose-Einstein (CBE), definido como el estado de la materia donde la estadística Bose-Einstein prevalece ante el Principio de exclusión de Pauli. Mediante el enfriamiento extremo del isótopo Rubidio-87, se minimiza el ruido térmico para que los átomos colapsen en el estado de mínima energía. Este fenómeno es posible gracias a la coherencia cuántica, que causa que las ondas de Broglie se sincronicen en fase, eliminando la identidad atómica individual y dando lugar a una única identidad macroscópica con propiedades como la superfluidez.

**Palabras Claves**— Coherencia Cuántica, Condensado de Bose-Einstein, Estadística Cuántica, Indistinguibilidad, Rubidio-87.

## 1. INTRODUCCIÓN

Todos conocemos los tres estados de la materia: sólido, líquido y gaseoso. Los más inquietos conocen incluso el plasma, pero la naturaleza guarda un secreto: a temperaturas extremadamente frías aparece un quinto estado de la materia al que llamamos condensado de Bose-Einstein. Postulado por Bose y Einstein en 1925 y demostrado setenta años más tarde, en 1995.<sup>1,2</sup>

Para entender qué sucede en este nuevo escenario, debemos fijarnos en la longitud de onda De Broglie, predominando sobre el carácter corpuscular del sistema. Mientras que a temperaturas altas el ruido térmico obliga a los átomos a comportarse como partículas individuales, el frío extremo permite que su naturaleza ondulatoria se manifieste.<sup>4</sup>

El Rubidio-87 es el protagonista de este experimento. El átomo se rige por la estadística de Bose-Einstein. Esto lo libera de cumplir principios como la estadística de Fermi-Dirac<sup>7</sup> o el Principio de exclusión de Pauli,<sup>8</sup> facilitando el colapso hacia un estado de energía único, más adelante profundizaremos en el tema, tocando todos los puntos necesarios para poder obtener este condensado.<sup>1</sup>

## 2. EL DUELO DE ESTADÍSTICAS: ¿BOSÓN O FERMIÓN?

### 2.1. El carné de identidad: el espín

La naturaleza de cualquier sistema físico se rige por su espín total, una propiedad cuántica fundamental que dicta las leyes que debe obedecer. Mientras que en las partículas elementales el espín es una cualidad intrínseca, este valor permite clasificarla en dos grandes familias: los bosones, que poseen espines enteros como el 0 (bosón de Higgs), el 1 (fotón) o el 2 (hipotético gravitón); y los fermiones, caracterizados por espines semienteros como el  $\frac{1}{2}$  (electrón y quarks). En sistemas más complejos, como los átomos, este valor se determina mediante la suma de los componentes. Así, un átomo se comportará como un bosón si la suma de sus constituyentes resulta en un número par ( $^4\text{He}$ ), o como un fermión si dicha suma es impar ( $^3\text{He}$ ).<sup>11</sup>

### 2.2. La barrera de Fermi-Dirac

Los fermiones están sujetos al Principio de exclusión de Pauli<sup>8</sup>, de forma que dos partículas no pueden ocupar el mismo estado cuántico. La distribución de estas partículas sigue la estadística de Fermi-Dirac:  $F(\epsilon) = \frac{1}{e^{(\epsilon-\mu)/k_B T} + 1}$ <sup>7</sup>, donde  $\epsilon$  toma valores discretos (cuantizados) e indica el nivel energético y  $F(\epsilon)$  es la probabilidad de ocupación de un estado con dicha energía. El +1 del denominador es el factor que impedir el colapso energético, de forma que obliga a los átomos a apilarse en niveles sucesivos conforme se reduce la temperatura.<sup>4</sup>

### 2.3 El Rubidio-87: por qué es el candidato ideal

La creación de un condensado requiere que el sistema se comporte como una entidad cuántica única. El  $^{87}\text{Rb}$  es un candidato ideal, ya que la suma de sus constituyentes (37p, 37e, 50n) da un número par (124). Esta configuración le confiere un espín entero, lo que le permite eludir el Principio de Pauli y colapsar en el estado de mínima energía.<sup>2</sup>

Para entender la estabilidad de este sistema, la teoría de campos señala un parámetro crítico: la longitud de dispersión. En el  $^{87}\text{Rb}$ , esta es positiva, lo que implica la existencia de una interacción repulsiva entre las partículas del sistema, lo cual evita que el gas implompe o se condense en un sólido al enfriarse. Esta repulsión actúa como una fuerza interna que mantiene el condensado estable y diluido.<sup>1,2</sup>

Finalmente, gracias a la estructura electrónica facilita el uso de láseres de diodo: mediante la transferencia de momento lineal, se reduce la energía cinética hasta temperaturas de microkelvin, siendo un paso previo y necesario para la creación de este estado.<sup>3</sup>

### 3. EL CONCEPTO DE INDISTINGUIBILIDAD

#### 3.1 Teoría vs. Matemáticas: la base de la estadística de Bose-Einstein

La diferencia entre bosones y fermiones reside en cómo reacciona la función de onda ( $\psi$ ) cuando dos partículas A y B se intercambian de posición.<sup>1,4</sup>

En el caso de los bosones, si tienes 2 bosones y los intercambias, la función de onda no se ve afectada, a esto se le conoce como simetría, matemáticamente se describe como:  $\psi(A, B) = \psi(B, A)$

Como consecuencia de esta simetría, los bosones no están sujetos a restricciones de ocupación, pudiendo “amontonarse” en el estado fundamental. Este fenómeno, potenciado por la interferencia constructiva, sus funciones de onda se refuerzan, facilitando el amontonamiento de partículas, dando lugar a la formación del condensado.<sup>1,4</sup>

Por el contrario, los fermiones, si tienes 2 fermiones y los intercambias, la función de onda cambia de signo, a este fenómeno se le llama antisimetría, matemáticamente se describe como:  $-\psi(A, B) = \psi(B, A)$

A causa de este cambio de signo existe el Principio de exclusión de Pauli. Matemáticamente si colocamos dos fermiones en el mismo estado, la única solución para la ecuación es cero; esto significa que la probabilidad de encontrarlos en el mismo estado es nula. La única forma de hacer condensados con ellos es mediante fuerzas externas como los pares de Cooper en los superconductores.<sup>1,4</sup>

#### 3.2 Indistinguibilidad y pérdida de identidad

La indistinguibilidad, concepto clave en la formación del condensado, marca el punto de transición donde los átomos individuales pierden su identidad propia. Esto significa que no podemos asignar una “etiqueta” a un átomo basándonos en sus características. Desde la perspectiva de la teoría de la información, la indistinguibilidad implica que no existe ningún dato o parámetro físico que nos permita diferenciar las partículas. Mientras que en un sistema clásico podríamos identificar una partícula por su posición y velocidad exactas, en el mundo cuántico el Principio de Incertidumbre de Heisenberg hace imposible tal distinción. Al enfriarse y colapsar en el estado fundamental, las funciones de onda de los átomos se solapan tanto que cualquier parámetro que permita distinguir uno de otro se vuelve indeterminado.<sup>1,4,5</sup>

### 4. EL DESAFÍO DEL CERO ABSOLUTO

En condiciones normales, los átomos se mueven cientos de metros por segundo y chocan de manera caótica. A esto se le conoce como “ruido térmico”, el cual actúa como una interferencia que impide que las funciones de onda se manifiesten. Este efecto se da siempre que  $T > 0$ ; cuando  $T = 0$ , según el principio de incertidumbre, queda una vibración residual<sup>4</sup>. El objetivo no reside en solo enfriar el sistema, sino también tener el gas diluido para que los átomos no solidifiquen antes de alcanzar este estado. Solo eliminando este ruido térmico es posible que la longitud de onda de Broglie de cada átomo crezca lo suficiente para solaparse con sus vecinos, permitiendo que la teoría de la indistinguibilidad se convierta en una realidad física. Cuando se cumple que  $\lambda_{dB} = \frac{h}{\sqrt{3mk_B T}} > d$ ; (donde  $d$  es la distancia entre partículas) y el sistema se comporta como un bosón, las funciones de onda colapsan<sup>1</sup> en un único estado macroscópico.<sup>1,2,4</sup>

Como dato adicional, este fenómeno tiene una gran relación con el principio de incertidumbre;  $\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$ ; al reducir la agitación térmica, minimizamos la incertidumbre del momento ( $\Delta p \rightarrow 0$ ), obligamos a la función onda a expandirse en el espacio ( $\Delta x \rightarrow \infty$ ). Esto es lo que provoca el solapamiento de los átomos y la pérdida de la individualidad.<sup>4,5</sup>

### 5. TÉCNICAS DE ENFRIAMIENTO

#### 5.1 Melaza Óptica: frenado con láseres

Para reducir el momento lineal, Phillips ideó un sistema de seis láseres contrapuestos en los tres ejes del espacio. Su funcionamiento se basa en crear una fuerza de fricción viscosa mediante el uso de estos láseres.<sup>3</sup>

Fundamento del enfriamiento Doppler: Los láseres se sintonizan a una frecuencia ligeramente inferior a la de resonancia del átomo. Debido al efecto Doppler, el átomo

(entendido como su propio sistema de referencia) solo percibe la energía necesaria para la absorción cuando se desplaza hacia la fuente de luz. Mientras que un observador externo ve una longitud de onda mayor, la partícula percibe una contracción de la onda debido al movimiento relativo. Este aumento de energía es el que permite que el átomo absorba el fotón, y por transferencia de momento lineal, reduzca su velocidad.<sup>3</sup>

**Mecánica de frenado.** Al absorber el fotón, el átomo recibe un impulso opuesto que reduce su velocidad cinética. Posteriormente, el átomo reemite dicho fotón en una dirección aleatoria; tras múltiples ciclos, el efecto neto de la emisión es nulo.<sup>3</sup>

**Efecto de “melaza” óptica.** Esta interacción genera una fuerza siempre opuesta al vector velocidad, simulando la resistencia de un fluido viscoso. Como se detalló en la sección 4, esta minimización del momento lineal expande la longitud de onda de Broglie del átomo, facilitando el solapamiento de las funciones de onda y el inicio de la condensación.<sup>3</sup>



Fig. 1: Esquema de la evolución de un sistema con ruido térmico hacia la unificación de las funciones de onda en un estado coherente. (Transición de fase cuántica)

## 5.2 Trampa magnética: cómo mantener los átomos en el vacío

Tras el frenado por láseres, los átomos deben ser aislados para evitar colisiones con las paredes de la cámara, las cuales transferirían energía térmica de nuevo a las partículas.<sup>3</sup>

**Confinamiento por Espín.** Al poseer un momento magnético intrínseco (espín), los átomos se comportan como agujas de brújulas que pueden ser manipuladas mediante campos magnéticos.<sup>3,4</sup>

**Pozo de Potencial.** Mediante bobinas externas, se genera un gradiente donde el campo magnético es nulo en el centro que aumenta hacia los bordes. De esta forma, los átomos quedan en el centro, dentro del “pozo” de energía, levitando en la cámara de ultra-alto vacío sin contacto físico con las paredes.<sup>2,3</sup>

## 5.3 Enfriamiento por evaporación

Tras completar estas etapas, los átomos han alcanzado temperaturas del orden de microkelvin, pero el ruido térmico sigue siendo excesivo y ya llegamos al límite teórico

de los láseres. Para reducir más la temperatura, al orden de nanokelvin, aplicamos el enfriamiento por evaporación.

**Purga selectiva.** Se reduce gradualmente la intensidad de la trampa magnética para disminuir la barrera de potencial. Esto permite que los átomos con mayor energía cinética escapen del sistema, ajustando la barrera justo por encima de la temperatura media definida por la estadística de Maxwell-Boltzmann<sup>1,2</sup>

**Re-thermalización.** Los átomos restantes chocan entre sí y redistribuyendo su energía, lo que disminuye la temperatura media del conjunto. Es el mismo proceso por el cual un café se enfría: ya que las moléculas más rápidas se escapan en forma de vapor.<sup>1,2</sup>

**Transición de Fase.** Al alcanzar la densidad y temperatura crítica, la longitud de onda de Broglie crece lo suficiente como para que las funciones de onda individuales de los átomos se solapan. Los átomos pierden su identidad individual y el gas se transforma en un CBE, el único estado cuántico macroscópico donde todas las partículas se comportan como una sola entidad. Así se alcanza el quinto estado de la materia, el CBE.<sup>1,2,4</sup>

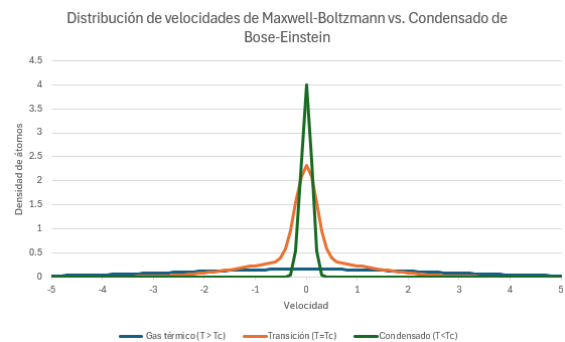


Fig. 2: Evolución de la densidad atómica según la distribución de velocidades. En la curva azul se observa el comportamiento de un gas térmico clásico. Al alcanzar la temperatura crítica ( $T_c$ ), comienza la transición de fase al estado fundamental. Finalmente, el pico verde representa la formación del CBE, donde la mayoría de los bosones se concentran en el estado de momento cero.

## 6. PROPIEDADES DEL CONDENSADO

### 6.1 Coherencia cuántica: una sola función onda

Al cruzar la temperatura crítica en el sistema, los átomos pierden su identidad individual para actuar como una sola entidad. Este fenómeno implica que el condensado deja de describirse como un conjunto de partículas para definirse mediante una única macrofunción de onda. En este estado de coherencia, todos los átomos comparten la misma fase y nivel energético de mínima energía, haciendo que los efectos cuánticos (normalmente microscópicos) se vuelvan visibles a escalas macroscópicas. Esta indistinguibilidad y sincronía de fase es lo que permite que el sistema se comporte como un todo indivisible.<sup>1,2,4</sup>

## 6.2 Superfluidez: movimiento sin fricción

La superfluidez es una manifestación directa de la coherencia cuántica. Debido a la ausencia de viscosidad, el condensado fluye sin pérdida de energía por fricción, permitiendo un movimiento perpetuo incluso en capilares estrechos. Este fenómeno se rige por el principio de "todo o nada": al ser una única identidad, el sistema no puede frenarse por partes; o se mueve el condensado entero o no se mueve nada. Además, si se induce una rotación, el sistema no gira de forma uniforme, sino que genera vórtices cuantizados (diminutos remolinos cuya circulación está restringida a valores discretos) confirmando así su naturaleza puramente cuántica.<sup>2, 3, 4</sup>

## 6.3 Interferencia de materia

En este punto se manifiestan las propiedades ondulatorias a escala macroscópica:

Doble naturaleza: Si consiguiéramos dividir el condensado en dos y dejamos que se expandan y colisionen, no se mezclan como gases clásicos. En su lugar, forman un patrón de interferencia análogo al experimento de la doble rendija de Young, de forma que se deduce que tiene propiedades de onda.<sup>4, 6</sup>

Interferencia Constructiva y Destructiva: Las zonas oscuras representan nodos donde la función de onda es nula ( $|\psi|^2 = 0$ ), lo que implica una probabilidad cero de hallar partículas. Por contrario, las zonas claras indican regiones de máxima acumulación. Esta macrofunción describe la densidad (más concentrado el <sup>87</sup>Rb) del sistema completo.

Confirmación Experimental: Este fenómeno es idéntico al de la luz en un experimento de Young, pero realizado con átomos de Rubidio-87, lo que demuestra que el CBE se rige puramente por la fase de su función onda.<sup>1, 2, 4, 6</sup>

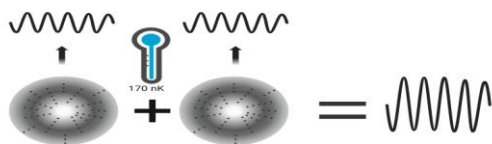


Fig. 3: Esquema del solapamiento de las funciones de onda individuales hasta la formación de una macrofunción de onda única y coherente

## 7. Discusión

### 7.1 Impacto tecnológico de los fluidos cuánticos

Las propiedades de coherencia y superfluidos del CBE tienen aplicaciones que algunas ya están cambiando la tecnología. Se está investigando relojes atómicos ultra precisos, ya que actualmente los relojes de precisión que tenemos son sistemas caóticos, los cuales presentan errores, con el CBE podríamos optimizar muchísimo este proceso. Otra

área es la computación cuántica, donde una de las mayores debilidades es la decoherencia, el ruido que borra los datos, un sistema con CBE permite muchísima más estabilidad que uno convencional, e incluso, gracias a la superfluidez podríamos mover átomos cargados de información a través de circuitos cuánticos sin generar resistencia ni calor, de forma que podemos mantener la coherencia en la información. Esto y un sin fin más de aplicaciones y nuevas tecnologías y lo que queda por descubrir.<sup>1-5, 9, 10</sup>

### 7.2 Conclusión

El condensado de Bose-Einstein es la culminación de la estadística cuántica, donde la indistinguibilidad de las partículas permite que miles de átomos actúen como una sola entidad. Tras superar el caos del ruido térmico mediante técnica avanzadas de enfriamiento, demostrando que las leyes cuánticas no son exclusivamente del micromundo, sino que puede manifestarse a escalas macroscópicas. Esta transición no es una simple curiosidad de laboratorio; es la prueba de que la frontera entre lo cuántico y nuestra realidad cotidiana es como mas pequeña de lo que imaginamos. Con este quinto estado, transformamos un hito teórico en una herramienta tecnológica que, en un futuro cercano, definirá la precisión de nuestro día a día.

## Referencias

1. Anderson, M. H., et al. (1995). "Observation of Bose-Einstein Condensation in a Dilute Atomic Vapor". *Science*.
2. Cornell, E. A., & Wieman, C. E. (2002). Bose-Einstein condensation in a dilute gas, the first 70 years and some recent experiments. *Reviews of Modern Physics*, 74(3), 875-893.
3. Phillips, W. D. (1998). Nobel Lecture: Laser cooling and trapping of neutral atoms. *Reviews of Modern Physics*, 70(3), 721-741.
4. Cohen-Tannoudji, C., Diu, B., & Laloë, F. (1977). *Quantum Mechanics* (Vol. 2). Chapter XIV: "Identical Particles". Wiley-VCH.
5. Shannon, C. E. (1948). "A Mathematical Theory of Communication". *The Bell System Technical Journal*, Vol. 27, pp. 379-423, 623-656.
6. Young, T. (1807). *A Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts*. London: Joseph Johnson
7. Dirac, P. A. M. (1926). "On the Theory of Quantum Mechanics". *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 112(762), 661-677.
8. Pauli, W. (1925). "Über den Zusammenhang des Abschlusses der Elektronengruppen im Atom mit der Komplexstruktur der Spektren". *Zeitschrift für Physik*, 31(1), 765-783.
9. Aveline, D. C., et al. (2020). "Observation of Bose-Einstein condensates in an Earth-orbiting research lab". *Nature*, 582, 193-197.
10. Byrnes, T., et al. (2012). "Macroscopic quantum computation using Bose-Einstein condensates". *Physical Review A*, 85, 040306(R).
11. CERN. (s.f.). "The Standard Model".