

Condensado de Bose-Einstein: Introducción y Perspectivas

Luis Ever Young Silva

Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Cartagena

Grupo de Modelado Computacional (GruMoC).

Cartagena de Indias, Bolívar, Colombia.

e-mail:lyoung@unicartagena.edu.co

RESUMEN

El Condensado de Bose-Einstein (BEC) es un nuevo estado de la materia [1], predecido teóricamente en la década de 1920, bajo los importantes trabajos de Satyendra Bose y Albert Einstein sobre las propiedades de los fotones y las partículas con spin entero. Inicialmente Bose describió reglas para determinar si dos fotones debían considerarse idénticos o diferentes, lo que constituyó las bases de la mecánica estadística idea que posteriormente permitió predecir el estado condensado de Bose-Einstein al extenderse a partículas con masa [1].

Experimentalmente el Condensado de Bose-Einstein fue obtenido por primera vez en 1995 [2] cuando isótopos, con espín entero, fueron confinados bajo la manipulación y control de trampas ópticas y magnéticas en un gas diluido para átomos de un metal alcalino, con densidad de partículas del orden de 10^{14} cm^{-3} (mucho menor que la densidad del aire en condiciones normales que es 10^{19} cm^{-3}) en ultra-bajas temperaturas del orden de los nanoKelvin (10^{-9} K).

Conocemos que la ecuación de Schrödinger describe en forma adecuada el comportamiento de algunos sistemas cuánticos y que en una dimensión espacial tiene la forma [3]:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi(x,t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x,t)}{\partial x^2} + V(x,t)\Psi(x,t) \quad (1)$$

donde $\hbar = 2\pi/h$ es la constante de Planck reducida, $\Psi(x,t)$ es la función de onda, el primer término a la derecha representa la energía cinética del sistema y el segundo el potencial externo. De cierta manera, el término del potencial externo determina la naturaleza del problema cuántico pues al conocer la forma del potencial se resuelve la ecuación de Schrödinger para describir el sistema específico. En el caso del BEC el potencial externo se utiliza para representar la trampa que confina los átomos, la cual es descrita por un potencial tipo oscilador armónico.

Sin embargo, incluir este potencial en la ecuación 1 no es suficiente para el estudio adecuado de un sistema de átomos interactuando. Por lo cual, describimos físicamente

un BEC usando la siguiente extensión a la ecuación de Schrödinger, que en el caso de 1D se puede expresar como:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V_{ext} + \frac{4\pi\hbar^2 a N}{m} |\Psi|^2 \right) \Psi \quad (2)$$

la anterior es la denominada ecuación Gross-Pitaevskii para N átomos de masa m la cual contiene un término no lineal que describe la interacción atómica efectiva de corto alcance, donde a es la longitud de dispersión, una característica que es positiva y del orden de 100 veces el radio de Bohr.

En el quehacer de nuestra investigación científica hemos desarrollado códigos numéricos [4] que resuelven la anterior ecuación Gross-Pitaevskii, o similares, en diversos contextos para átomos con o sin interacción dipolar por lo cual mostraremos aplicación tales como el estudio de soluciones tipo solitones y la existencia de droplets que forman estructuras en una red periódica de simetría específica, para sistemas tipo super-sólidos que recientemente han llamado la atención de la comunidad científica [5]. Resaltando como uno de los más relevantes aportes de nuestra investigación el colocar a disposición de la comunidad académica diversas herramientas de modelado computacional con las cuales es posible explorar fenómenos cuánticos a escala macroscópica. Estos códigos numéricos pueden fácilmente ser usados en la solución de cualquier problema que involucre una forma más allá de la ecuación de Schrödinger tradicional o en sistemas con descripciones similares a aquella de los átomos ultra-fríos que requieran solución de una ecuación diferencial (o integro-diferencial) parcial no lineal.

[1] A. Leggett, Quantum Liquids: Bose condensation and Cooper pairing in condensed-matter systems, Oxford Graduate Texts. OUP Oxford, 2006, isbn: 9780191037214. dirección: <https://books.google.com.co/books?id=HnlPAwAAQBAJ>.

[2] M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Matthews, C. E. Wieman y E. A. Cornell, «Observation of Bose-Einstein condensation in a dilute atomic vapor», science, vol. 269, 5221, págs. 198-201, 1995.

[3] D. J. Griffiths y D. F. Schroeter, Introduction to quantum mechanics. Cambridge University Press, 2018.

[4] L. E. Young-S., P. Muruganandam, S. K. Adhikari, V. Lončar, D. Vudragović y A. Balaž, «OpenMP GNU and Intel Fortran programs for solving the time-dependent Gross-Pitaevskii equation», Computer Physics Communications, vol. 220, págs. 503-506, 2017, issn: 0010-4655. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2017.07.013>.

[5] M. A. Norcia, C. Politi, L. Klaus y col., «Two-dimensional supersolidity in a dipolar quantum gas», Nature, vol. 596, 7872, págs. 357-361, 2021. doi: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03725-7>