

ARTÍCULO

## **GASES ATÓMICOS A TEMPERATURAS CERCANAS AL CERO ABSOLUTO**

*Rosario Paredes Gutiérrez*  
*Investigador del Instituto de Física, UNAM*  
*rosario@fisica.unam.mx*

## GASES ATÓMICOS A TEMPERATURAS CERCANAS AL CERO ABSOLUTO

### Resumen

En este artículo se presenta una descripción de las propiedades y del comportamiento de los gases atómicos a temperaturas cercanas al cero absoluto, es decir, a  $-273$  grados *Celsius*. En primer lugar se establecen las diferencias entre fermiones y bosones, que son los dos tipos de átomos que existen en la naturaleza. Se discuten las diferencias del comportamiento de los gases atómicos dependiendo de la naturaleza fermiónica o bosónica de los átomos que los componen cuando la temperatura se reduce drásticamente. Se describen las técnicas desarrolladas durante varias décadas para la obtención de temperaturas por debajo de un nanokelvin, y que son las más bajas que se han alcanzado jamás. Dichos métodos son enfriamiento a través de luz láser, el enfriamiento por evaporación y el enfriamiento asistido. Finalmente, se describen los fenómenos únicos que exhiben estos gases, esto es, la condensación de Bose-Einstein y la formación de un gas degenerado de Fermi.

**Palabras clave:** Gases atómicos, bajas temperaturas, fermiones, bosones, efectos cuánticos.

## ATOMIC GASES AT TEMPERATURES NEAR ABSOLUTE ZERO

### Abstract

A description of the properties and behaviour of atomic gases at temperatures near absolute zero,  $-273$  Celsius degrees, is presented in this paper. First, we establish the differences between fermions and bosons, which are the two types of atoms in nature. The differences in the behaviour of the atomic gases due to their fermionic or bosonic nature, as the temperature is drastically reduced, are discussed here. We also describe the methods that were developed during the past decades for cooling atomic gases at temperatures below one nanokelvin, which are the lowest temperatures ever achieved. These methods are laser cooling, evaporative cooling and sympathetic cooling. Finally, we describe the peculiar phenomena observed in these gases, namely, Bose-Einstein condensation and the formation of a degenerated Fermi gas.

**Keywords:** Atomic gases, low temperatures, fermions, bosons, quantum effects.

## INTRODUCCIÓN

El entendimiento de la naturaleza se basa en el estudio de los objetos o sistemas que la componen, y en las conclusiones que de ellos se obtienen a través de los experimentos y la teoría involucrados en su descripción. Estos cuerpos poseen dimensiones que van desde los Angstroms Å (10<sup>-10</sup> metros) que es el tamaño característico de los átomos, hasta los miles de metros, que es por ejemplo la magnitud del diámetro de la tierra. Todos estos objetos y otros de dimensiones aun menores y mayores son el propósito de estudio de la física.

Nuestro interés en este artículo es describir las propiedades y el comportamiento de sistemas compuestos de una cantidad macroscópica de átomos, y que aun estando a muy bajas temperaturas se encuentran en su fase de vapor. Estos son los denominados gases atómicos ultrafríos que se componen típicamente de 10<sup>7</sup> átomos y ocupan un espacio de alrededor de 1 mm<sup>3</sup>. La temperatura de uno de estos gases es de alrededor de 50 nK (10<sup>-9</sup> kelvins), es decir solamente unas billonésimas de grado arriba del cero absoluto. El hecho que un conjunto tan grande de átomos a esta temperatura permanezcan en una fase gaseosa se debe a que su densidad es muy baja. Por ejemplo, comparados con el aire que respiramos, una de tales muestras producidas en el laboratorio posee una densidad 100,000 veces menor.

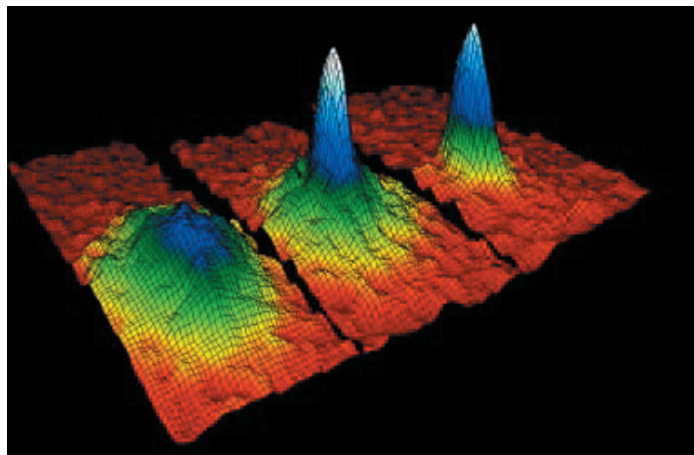
El comportamiento de los gases atómicos ultrafríos es cualitativamente distinto dependiendo del tipo de átomos que componen el gas. Existen dos tipos de átomos en la naturaleza: fermiones y bosones, y todos los átomos de la tabla periódica pertenecen a una de estas dos categorías. La diferencia entre fermiones y bosones tiene su origen en el número total de electrones, protones y neutrones que posee el átomo en cuestión; si la suma de electrones, protones y neutrones es impar, el átomo es un fermión, mientras que si esta suma es par, el átomo es un bosón. La consecuencia esencial de ser fermiones es que dos partículas idénticas no pueden ocupar el mismo estado; esto significa que las variables que caracterizan cada una de estas partículas tendrán siempre valores distintos. Esta propiedad es también conocida como el Principio de Exclusión de Pauli. En contraparte, la propiedad más importante de los bosones, es que dos o más partículas idénticas pueden ocupar el mismo estado. Cabe recalcar que los protones, electrones y neutrones son en sí mismos fermiones, y que las partículas de luz, llamadas fotones, son bosones.

Si los átomos que componen el gas ultrafrío son bosones, entonces, al llegar a una cierta temperatura, el gas sufre el fenómeno conocido como Condensación de Bose-Einstein, que significa que un porcentaje significativo de los átomos se van al estado base, es decir el estado de más baja energía, y se dice que todos estos átomos se han condensado. En tanto que si los átomos que conforman el gas son fermiones, y la temperatura del gas es lo suficientemente baja, los átomos se acomodan cada uno en la escala energética de menor a mayor valor para formar un gas degenerado de Fermi. Debemos hacer énfasis en que un gas de Bose tiene una energía mucho menor que un gas degenerado de Fermi como consecuencia del hecho de que en el gas de Bose la mayoría de las partículas pueden tener la misma energía, la cual en el caso de los gases atómicos ultrafríos es muy baja. Explicaremos más ampliamente las propiedades y comportamiento de dichos gases atómicos ultrafríos.

## CONDENSACIÓN DE BOSE-EINSTEIN

En 1925 Bose y Einstein predijeron que si fuera posible enfriar un gas de bosones, conservando en todo momento sus propiedades de gas, existiría una temperatura por encima del cero absoluto, llamada temperatura crítica ( $T_c$ ), a la cual el gas exhibiría un comportamiento extraño en el que un porcentaje significativo de sus átomos ocuparía el mismo estado, siendo éste el estado de energía cero. Es decir, una parte del gas tendría energía cero, y como consecuencia de este hecho las propiedades del sistema se modificarían radicalmente. No fue sino hasta 1995 cuando se comprobó experimentalmente esta teoría, y se produjo por primera vez un condensado de Bose-Einstein en un laboratorio.

De hecho, este suceso ocurrió paralelamente en tres laboratorios de Estados Unidos, en Colorado, en Texas y en Massachussets. En cada uno de ellos se “fotografió” una nube de átomos de la cual es posible inferir el valor de la energía, la temperatura y el número de partículas en cada una de las etapas durante el proceso de formación del condensado. En la Figura 1 se observan la distribución de velocidades de átomos de rubidio para diferentes temperaturas. Estas imágenes pueden obtenerse utilizando un método de expansión, el cual consiste en permitir que la nube de gas se expanda libremente y colocando sensores capaces de detectar las posiciones de los átomos en la nube.



*Figura 1. Se observa la distribución de velocidades de un gas de bosones durante la formación de un condensado. La figura izquierda corresponde a un gas a una temperatura mayor que la temperatura de condensación ( $T_c$ ). La figura central es justo después de la aparición del condensado, y la figura derecha muestra un gas que tiene un menor número de átomos, pero el cual sigue en su fase condensada. La altura de los picos representa el número de átomos en cada velocidad, siendo el pico más alto el que corresponde a los átomos con energía igual a cero.*

Las partículas del gas que se han ido al estado base, o estado de mínima energía, tienen energía igual a cero. Debemos resaltar que este es el significado del cero absoluto. Si todos los átomos del gas tuvieran energía cero, el gas tendría entonces temperatura cero. Sin embargo, como se observa en la Figura 1, no todas las partículas tienen velocidad cero, y son este conjunto de partículas las que determinan las propiedades físicas del gas. Todas las partículas que se encuentran en el condensado no participan en las propiedades dinámicas del gas; por ejemplo, podemos decir que estos átomos no ejercerán presión y no contribuirán a la energía sistema.

La obtención de un condensado de Bose-Einstein se logró hasta fechas recientes debido a que en tiempos pasados no era posible conseguir temperaturas suficientemente bajas como la denominada temperatura crítica ( $T_c$ ), la cual, a su vez, depende de la densidad del gas. Como hemos señalado antes, las densidades para las cuales el gas conserva sus propiedades de gas son muy bajas, y estas exigen temperaturas del orden de fracciones de microkelvins para que ocurra la condensación de Bose-Einstein.

La temperatura de un gas es una medida de la velocidad promedio de las partículas que lo componen, de tal forma que si los átomos en el gas se mueven muy rápido el gas tendrá una temperatura alta, y al contrario, a medida que las velocidades de los átomos disminuyen el gas se enfría. El gran reto experimental desde la predicción teórica de la condensación de Bose-Einstein fue lograr un mecanismo capaz de “frenar” a los átomos de un gas hasta obtener una temperatura equivalente a la temperatura crítica.

Durante las dos décadas pasadas se desarrollaron nuevos métodos para enfriar gases atómicos a temperaturas que permitieran obtener condensados de Bose-Einstein y gases degenerados de Fermi. Estos métodos son el enfriamiento a través de luz láser y el enfriamiento por evaporación. Ambos métodos se basan en el hecho que el decremento en la temperatura de un gas se debe al intercambio de energía del mismo con otro sistema. En el caso de enfriamiento láser el intercambio se realiza a través de emisión y absorción de fotones, mientras que el enfriamiento por evaporación es el resultado de extraer selectivamente los átomos más energéticos, dejando que los restantes lleguen a un estado de equilibrio en el cual la temperatura es menor.

El enfriamiento láser se basa en el hecho de considerar la dispersión de luz láser (fotones) por los átomos, y el principio básico es que los átomos y fotones intercambian energía. Uno podría pensar que el efecto de la incidencia de luz sobre los átomos del gas tendría como consecuencia incrementar su temperatura. Sin embargo, el truco consiste en conseguir que en promedio la energía de los fotones dispersados por cada átomo sea mayor que la energía con la que incidieron. Si se consigue que los átomos absorban la luz solo viniendo de una dirección, y emitiendo en cualquier otra, entonces el resultado neto es que el átomo pierde velocidad en la dirección en la que se movía originalmente. De esta forma la velocidad se reduce y por lo tanto la temperatura del gas disminuye después de que muchos de estos procesos ocurren.

El enfriamiento por evaporación se consigue quitando del gas los átomos más energéticos, es decir los átomos con velocidades más altas, y permitiendo que los átomos restantes lleguen a un estado de equilibrio en el que la temperatura final sea menor. Este estado de equilibrio se alcanza después de que los átomos del gas tienen en promedio la misma velocidad, y para que esto ocurra es necesario el intercambio de energía de los átomos a través de choques entre ellos. En la práctica, la posibilidad de extraer selectivamente del gas los átomos más energéticos, se debe a que los átomos utilizados para producir los condensados de Bose-Einstein (Rubidio, Sodio y Potasio) son altamente sensibles a la interacción con campos magnéticos, los cuales son bien controlados en esta clase de experimentos.

## GASES DEGENERADOS DE FERMI

Un gas degenerado de Fermi es una colección macroscópica de átomos tal que las partículas que lo componen se encuentran arregladas de menor a mayor valor en la escala de energía. Así, la partícula en el estado de más baja energía posee energía igual a cero, y la partícula que se encuentra en el estado más alto tiene una energía denominada energía de Fermi. El hecho de que los fermiones se distribuyan de esta forma, es una consecuencia de la imposibilidad de dos fermiones de ocupar el mismo estado cuántico. En la Figura 2 se ilustra esquemáticamente el arreglo energético para formar un gas degenerado de Fermi. Sin embargo, aunque de manera similar al caso de los bosones, no es posible llegar al cero absoluto de la temperatura, el fenómeno se puede observar a temperaturas muy bajas. Se ha encontrado en el laboratorio que las temperaturas necesarias para obtener un gas degenerado de Fermi son comparables a las que dan lugar a la Condensación en un gas de Bose, es decir solo algunas millonésimas de grado kelvin por encima del cero absoluto.

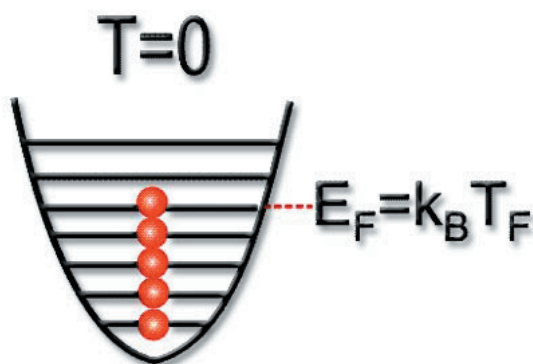


Figura 2. Se ilustra esquemáticamente el arreglo energético de un gas de fermiones cuando este tiene la menor temperatura posible y se forma un gas degenerado de Fermi. La energía  $E_F$  se conoce como energía de Fermi y corresponde a la energía del átomo situado en la parte más alta de este arreglo.

En un laboratorio, la imposibilidad de los fermiones de ocupar el mismo estado se traduce en la dificultad para enfriar un gas de Fermi. Como se ha explicado antes, el mecanismo último durante el proceso de enfriamiento de un gas atómico son las colisiones entre pares de partículas, ya que es a través de estos choques que el gas llega a un estado de equilibrio en el que la temperatura del sistema completo disminuye. Sin embargo, en un gas de Fermi, esta situación no se produce de forma natural debido a que de manera efectiva los fermiones presentan una especie de repulsión entre ellos, como consecuencia del Principio de Exclusión de Pauli, y esto impide que las partículas interactúen a través de colisiones.

Por tal motivo, el mecanismo que se empleó en el laboratorio para producir por primera vez un gas degenerado de Fermi fue combinar un gas de Fermi, a la temperatura mínima que se podía alcanzar utilizando las técnicas de enfriamiento explicadas antes, con un gas de bosones a temperatura mas baja, de tal forma que los fermiones pudieran chocar con los bosones menos energéticos, logrando de manera global disminuir la temperatura del gas de Fermi.

No fue sino hasta 1999 cuando se produjo un gas degenerado de Fermi utilizando esta técnica que se conoce como "enfriamiento asistido".

En la Figura 3 se ilustra una fotografía que representa este proceso, en ella se observan dos nubes, una exterior y otra interior. La nube exterior corresponde a un gas de Fermi, el cual después de haber estado en contacto con la nube interior, que es un gas de Bose a más baja temperatura, adquiere la misma temperatura que este último.

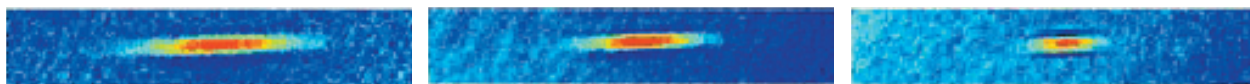


Figura 3. Se observan las fotografías correspondientes a nubes de átomos en el proceso que conduce a la formación de un gas degenerado de Fermi. La nube exterior es un gas de fermiones y la nube interior es un gas de bosones con una temperatura cercana a la temperatura crítica. La temperatura del gas de fermiones disminuirá como consecuencia de la interacción con el gas de bosones.

Después de la realización del gas degenerado de Fermi, el siguiente reto, y que es actualmente objeto de estudio de los gases atómicos, es la manipulación de la interacción entre pares de partículas a través del uso de campos magnéticos. Esta idea surgió debido a que el tipo de átomos usados para producir gases atómicos ultrafríos son extremadamente sensibles a la aplicación de un campo magnético, como se mencionó anteriormente. De manera paralela, la teoría desarrollada en el estudio de colisiones de partículas a bajas temperaturas predice que para un valor determinado de la interacción entre pares de partículas, existe la posibilidad de formar moléculas compuestas de dos fermiones. La relevancia del estudio de la dinámica de un gas ultrafrío de moléculas formadas por pares de fermiones, es que estas moléculas son precursoras del llamado estado superconductor. Un superconductor es un material que no ofrece resistencia eléctrica al paso de una corriente a través de él.

Durante mucho tiempo se había propuesto que los fenómenos de superconductividad y condensación de Bose están relacionados de forma muy cercana. La hipótesis detrás de esta suposición es que ambos fenómenos son dos ejemplos extremos de un comportamiento superfluido, el cual es un estado de la materia que no presenta resistencia al fluir. Por ejemplo cuando se coloca helio líquido superfluido en el centro de un contenedor abierto, éste espontáneamente tenderá a fluir hacia las paredes del contenedor. Tanto el estado superconductor como el superfluido abren la puerta tanto a nuevas formas de estudio de la materia como a posibles aplicaciones prácticas.

## CONCLUSIONES

La realización de los condensados de Bose-Einstein y el gas degenerado de Fermi son en sí dos grandes logros experimentales, que son consecuencia del trabajo teórico y experimental realizado en este campo durante varias décadas. Pero además, nos conducen al entendimiento del comportamiento de sistemas de naturaleza cuántica formados por una cantidad macroscópica de átomos

En el campo de los condensados de Bose probablemente el trabajo más interesante que se realiza actualmente es el estudio de la dinámica de estos cuando se confinan en redes ópticas, esto es, redes de luz en las que coexisten un gran número de piezas separadas de un condensado. En lo que respecta a los gases degenerados de Fermi, el interés es, como hemos expuesto, explicar el mecanismo físico que tiene lugar durante la transición entre un gas de fermiones y la formación de moléculas precursoras en el proceso de superconductividad.

El desarrollo de nuevas tecnologías esta sustentado en la capacidad de manipular y controlar estos sistemas cuánticos. Por ejemplo, se especula acerca de la construcción de una computadora cuántica, lo cual requiere no sólo de un conocimiento profundo, sino también un control total de la evolución temporal de estos sistemas.

## BIBLIOGRAFÍA

[http://cua.mit.edu/ketterle\\_group/Popular\\_papers/Ultralow\\_temperatures.htm](http://cua.mit.edu/ketterle_group/Popular_papers/Ultralow_temperatures.htm)

<http://jilawwww.colorado.edu/bec/index.html>

<http://jilawwww.colorado.edu/~jin/introduction.html>

<http://spot.colorado.edu/~cwieman/>

<http://physics.nist.gov/Divisions/Div842/Gp4/group4.html>

Agradecimientos: El trabajo de investigación que realizo es parcialmente apoyado por CONACYT a través del proyecto 41048-A1