

Enfriamiento de Átomos

Pedro Flores Silva

Universidad Nacional Autónoma de México.
Facultad de Ciencias
Ciudad Universitaria
04510 México D.F

Resumen

En el presente ensayo se da un breve resumen sobre el método de enfriamiento de átomos, por cuyo trabajo se otorgó el premio nobel en el año de 1997. Este método permite estudiar propiedades físicas y/o químicas de gases de partículas. El desarrollo teórico de este método esta estrechamente relacionado con la Física atómica, ya que los conceptos básicos de: niveles de energía de un átomo, efecto Stark, corrimiento Doppler entre otros, fueron parte fundamental para este desarrollo teórico y practico.

1. Introducción

La física del siglo XX dio lugar a nuevas teorías que lograron explicar fenómenos, que para aquel entonces la física clásica no podía explicar, las teorías más importantes son la mecánica cuántica y la relatividad. En el presente trabajo, se aborda el enfriamiento de átomos o moléculas mediante luz láser. Esta es claramente un tópico derivado de la teoría cuántica, este enfriamiento se basa en la idea principal que A. Einstein en 1917, probó: **La absorción y emisión de fotones en moléculas modifica las propiedades físicas de las mismas, en particular, el momento lineal** [1].

El enfriamiento de átomos consiste en desacelerar un conjunto de moléculas o átomos mediante radiación (láseres) para después ser confinadas en una cavidad pequeña del espacio, en las secciones siguientes se explica con mayor precision estas dos. Con esto es posible estudiar una variedad de propiedades y/o configuraciones de dichos objetos de estudio, como: llevar a configuraciones de átomos a niveles de energía cinética muy por debajo de las energías de **repulsión de fotones**, cuyo orden es de microKelvin (μK) [2], o el aislamiento de gases al vacio durante varios segundos [3].

2. Enfriamiento de Átomos y Iones por Láser.

Considérese un sistema interactuante láser estacionario-átomo-láser estacionario (véase figura 1), donde dicho átomo tiene más de dos niveles de energía y la frecuencia del haz provisto por el láser (ω_L) es inferior a la frecuencia de resonancia atómica (ω_R), esto es, $\omega_L < \omega_R$, donde . Dadas estas condiciones la probabilidad de absorber un foton producido por el láser es la misma para cada átomo, dicha absorción provoca un cambio en el momento del átomo en la dirección de propagación del láser. Supongamos que el átomo se mueve en dirección \hat{x}

(ver fig 1.) donde ponemos el sistema de referencia anclado en el átomo y designamos la dirección positiva del eje x hacia la derecha y la dirección positiva del eje y hacia arriba. Dado que el átomo se encuentra en movimiento y el haz provisto por ambos láseres es estacionario, la absorción de fotones debidos al láser que emite en dirección $-\hat{x}$ es más probable en comparación a la del otro láser, esto se debe al efecto Doppler que se presenta en el sistema, la frecuencia preferente de absorción será aquella que sea más cercana a la frecuencia ω_R [3]. Cualquier tipo de absorción de ondas genera una presión de radiación, que en el caso del sistema previamente descrito, esta radiación provoca una fuerza neta de fricción, que reduce la energía cinética del átomo.

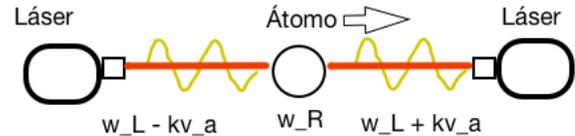


Figura 1: Representación esquemática del sistema láser estacionario-átomo-láser estacionario donde la frecuencia de ambos haces es ω_L , frecuencia de resonancia atómica ω_R , v_a la velocidad del átomo y k el numero de onda.

Basados en este resultado teórico, conocido como enfriamiento Doppler de una dimensión, en 1976 Steven Chu y sus colaboradores del *Bell Labs* lograron confinar en una pequeña región del espacio átomos, esto mediante el uso de 6 láseres alineados en tres pares perpendiculares (ver fig. 2), la región donde el haz de todos los láseres coinciden se denomina melaza óptica ó (**optical molasses**) y tiene la propiedad de enfriar y confinar átomos [4]. La temperatura mínima (límite Doppler T_D) predicha por el enfriamiento Doppler era calculada mediante la siguiente expresión [5]

$$T_D = \frac{\hbar\Gamma}{2k_B} \quad (1)$$

con k_B la constante de Boltzmann, Γ el ancho natural del

estado excitado.

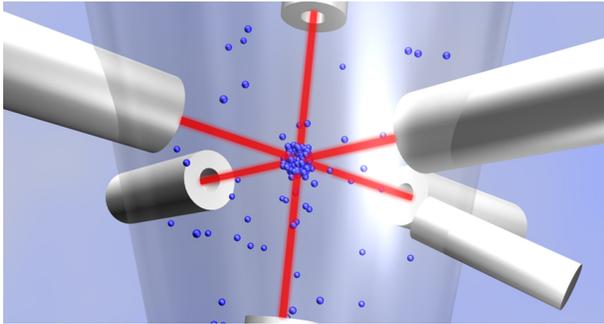


Figura 2: Representación esquemática de una melaza óptica, imagen de www.sciencenewsforstudents.org

De acuerdo con [4], [5] y [3], la temperatura mínima estimada es de entre $100\mu K$ y $300\mu K$ dependiendo del tipo de átomos empleados. Sin embargo en el año 1985 se encontró que para un conjunto de átomos neutros de sodio, la temperatura de este sistema en un volumen de 0.2 cm^3 era aproximadamente $0,2mK$ [1], este hecho llevo a reconsiderar la teoría del enfriamiento Doppler.

La cuestión era básicamente ¿Qué efectos no se consideran en el enfriamiento Doppler?. La explicación de como es posible llegar a estas temperaturas, que en las siguientes subsecciones se dará una explicación general, se debe a las investigaciones independientes realizadas por Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji y William Phillips, a quienes se les otorgó el premio nobel en 1997 por dicha explicación y por el enfriamiento y almacenamiento de átomos.

2.1. Efectos no considerados por el enfriamiento Doppler.

Los átomos son polarizados por el campo eléctrico debido a los 6 láseres, dicha polarización provoca una interacción Campo-momento dipolar atómico, interacción conocida como efecto Stark ac [5], que entre otras cosas modifica los niveles energéticos de cada átomo desplazándolos un valor $\pm\Delta E$, con respecto a los niveles de energía del mismo átomo, dicho desplazamiento depende de la frecuencia, la intensidad y la polarización del haz producido por un láser. Si la polarización circular del campo del láser es izquierda, denotado como σ^- entonces la intensidad de resonancia de un átomo ocurre a una frecuencia menor y si la polarización es derecha, σ^+ la intensidad de resonancia ocurre a frecuencias mayores comparados con el mismo átomo sin la presencia de campo externo [3].

La misma interacción con el campo polarizado genera un efecto llamado **bombeo óptico**, consiste en la transferencia de átomos de subniveles magnéticos a otros mediante

absorción y emisión de fotones, los corrimientos de energía, mencionados en el párrafo anterior, dependen de la probabilidad de transición de cada nivel.

En la zona de intersección de la melaza óptica hay interferencia debida a cada uno de los láseres, esta interferencia crea **gradientes de polarización**, esto es, se inducen cambios en la polarización que dependen de la longitud de onda, λ , el número de láseres empleados y la polarización del campo debido al láser, así los niveles de energía atómicos y la ocupación de los mismos por el átomo, dependen de la posición relativa del átomo en la melaza óptica. Debido a estos gradientes de polarización, la energía potencial de un átomo aumenta antes de sufrir el bombeo óptico, que lleva a este al menor nivel energético que depende de su nueva posición, bajo estas condiciones el átomo experimenta "saltos" entre subniveles permitidos, a cada salto le corresponde una absorción (energía potencial) y una emisión de fotones (ver fig. 3), esta emisión es mas energética que las absorciones que le permiten pasar de un nivel energético menor a otro mayor. En consecuencia el gas se enfría gradualmente. Este proceso se conoce como **Enfriamiento Sísifo**.¹ La temperatura mínima del sistema se obtiene, considerando dichos efectos, mediante la ecuación:

$$T_R = \frac{\hbar^2 k^2}{2Mk_B} \quad (2)$$

donde M es la masa atómica y $\hbar k$ es el momento del foton emitido por el átomo.

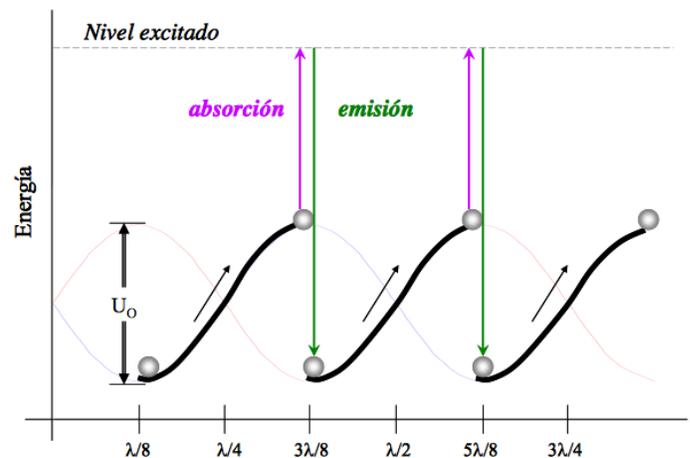


Figura 3: Enfriamiento Sísifo de un átomo, en una dimensión, dependiente de la longitud de onda, imagen de [6]

Referencias

- [1] **Nobel Prize in Physics 1997.** http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/

¹Mitología griega, condenado a llevar a una piedra a la cima de una montaña para dejarla caer y repetir el proceso eternamente [6].

- laureates/1997/advanced.html consultada el 26 de Marzo 2017.
- [2] **Rückstoßtemperatur** <https://de.wikipedia.org/wiki/Rückstoßtemperatur> consultada el 26 de Marzo 2017.
- [3] Advanced Optics Laboratory **Laser Cooling and Trapping** http://massey.dur.ac.uk/resources/grad_skills/LaserCooling.pdf consultada el 26 de Marzo 2017.
- [4] **Láseres de átomos?** <http://www.bdigital.unal.edu.co/35026/1/35258-138004-1-PB.pdf> consultada el 27 de Marzo 2017.
- [5] **Manipulación de átomos e iones con láseres** <http://www.bdigital.unal.edu.co/34981/1/35212-137809-1-PB.pdf> consultada el 27 de Marzo 2017.
- [6] Ibarra Durán A. **Por debajo del límite Doppler: el enfriamiento Sísifo.** Revista Tecnociencia Año 2005 Vol. 7 Núm 1.