

Enfriamiento Doppler y Sub-Doppler para un gas de Litio (${}^6\text{Li}$)

Laboratorio Avanzado

Freddy Jackson Poveda Cuevas

Catedras CONACyT - Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México

Resumen

Esta práctica será desarrollada por el estudiante en dos partes. En la primera deberá producir una trampa magneto-óptica compuesta por átomos de ${}^6\text{Li}$ manipulando correctamente los parámetros asociados a las técnicas recién mencionadas. Posteriormente deberá implementar un sistema de imagen para obtener imágenes por absorción óptica de la muestra y obtener así las propiedades físicas de ésta (número de átomos, densidad y temperatura) como función de algunos parámetros importantes del sistema. En la segunda parte de la práctica se implementa la técnica de enfriamiento sub-Doppler, conocida como melaza gris, en una muestra compuesta por una MOT de átomos de ${}^6\text{Li}$. Ésta consiste en la excitación de los niveles hiperfinos de la línea D1 de dicho átomo utilizando una configuración de tres niveles en configuración “lambda”. En esta práctica el estudiante deberá producir una trampa magneto-óptica compuesta por átomos de ${}^6\text{Li}$. Posteriormente deberá llevar la temperatura de la muestra por debajo del límite sub-Doppler implementando la técnica de enfriamiento por melaza gris y caracterizar su funcionamiento como función de algunos parámetros importantes del sistema.

Prerrequisitos

Éste laboratorio avanzado requiere de experiencia con equipo altamente especializado. Por esta razón, es necesario que el estudiante interesado tenga habilidades previas, con el fin de llevar a cabalidad todo los procesos sugeridos a continuación.

Parte I

Enfriamiento Doppler

1. Antecedentes

La trampa magneto-óptica (MOT, por sus siglas en inglés) es la culminación de varias décadas de esfuerzos en investigación y desarrollo tecnológico en la búsqueda de temperaturas ultra-bajas (1). Representa también el punto de partida en la producción de gases cuánticos como es el caso de condensados de Bose-Einstein (2) y gases degenerados de Fermi (3). De esta forma, la MOT revolucionó la manera de estudiar sistemas atómicos y hoy en día es un sistema fundamental en el desarrollo de la física atómica moderna.

Las trampas magneto-ópticas se producen fundamentalmente mediante la combinación de dos técnicas. Por un lado, se tiene la técnica de enfriamiento láser (4). Ésta consiste en utilizar el proceso de transferencia de momento que ocurre como resultado de la interacción de la radiación y los átomos de un vapor diluido con el objetivo de reducir la energía cinética del gas, y en consecuencia su temperatura. La segunda técnica se trata de la captura magnética (4), en donde se utiliza un gradiente magnético lineal que interactúa con el momento dipolar magnético del átomo creando una fuerza que apunta siempre hacia el punto en donde el gradiente se hace cero. La adecuada combinación de estas dos técnicas han permitido enfriar vapores compuestos por diferente elementos a temperaturas del orden de micokelvin.

2. Objetivos

1. Identificar los valores de los parámetros necesarios para producir una trampa magneto-óptica. Esto incluye:
 - a) Intensidad del campo magnético del desacelerado de Zeeman.
 - b) Gradiente del campo magnético del campo cuadrupolar de captura.
 - c) Frecuencia y polarización de los haces láser de enfriamiento y rebombeo.

- d) Alineación de los haces de enfriamiento y rebombeo.
- 2. Caracterizar las propiedades físicas de la MOT - número de átomos, temperatura y densidad - como función de:
 - a) Gradiente del campo cuadrupolar de captura.
 - b) Potencia de los haces de enfriamiento y rebombeo.
 - c) Desintonía del haz de enfriamiento.

3. Metodología

El Laboratorio de Materia Ultrafría cuenta ya con un sistema experimental capaz de producir una trampa magneto-óptica de átomos de ${}^6\text{Li}$. El estudiante iniciará la práctica familiarizándose con las partes más importantes de este sistema experimental por medio de la lectura de un documento producido en el laboratorio y que contiene una descripción exhaustiva del sistema experimental. Los pasos para realizar esta práctica son cinco y todos ellos involucran el uso apropiado del software de automatización del experimento:

1. El primer paso consiste en producir las frecuencias ópticas correctas. En primer lugar, el estudiante deberá estudiar y entender el funcionamiento del sistema láser que produce dichas frecuencias. Posteriormente deberá aprender la técnica de espectroscopia de absorción saturada (5) que permite crear una referencia de frecuencia utilizando una celda de espectroscopia con un vapor de litio en su interior. Esta técnica permitirá observar el espectro de la línea D2 del ${}^6\text{Li}$ y sus desdoblamientos hiperfinos. Por último, aprenderá a utilizar los circuitos de retroalimentación que hacen posible anclar la frecuencia del láser a esta referencia espectroscópica. El estudiante tendrá a disposición un medidor de onda que permita confirmar que el valor de la longitud de onda del láser es aproximadamente correcto.
2. El segundo paso consiste alinear los haces láser que permite la implementación del enfriamiento láser. Esto consiste en alinear tres pares de haces contrapropagantes que son ortogonales entre sí. Deberá también cerciorarse de que la polarización de estos haces sea correcta (polarización circular) utilizando un analizador de polarización.
3. El tercer paso es conectar las bobinas necesarias para producir el gradiente magnético de manera que la corriente circule en la dirección correcta. Este sistema consiste de dos bobinas que deberán conectarse en configuración anti-Helmholtz. La dirección del campo magnético debe ser consistente con el sentido de la polarización circular de los haces mencionados en el punto anterior. El estudiante tendrá a disposición una sonda de Efecto Hall que permite medir la intensidad y dirección del campo magnético.
4. Si los pasos anteriores fueron realizados de manera correcta, la trampa magneto-óptica debería haberse producido. En tal caso, es momento de construir el sistema de imagen por absorción óptica (5). La idea de este sistema de imagen es iluminar a la muestra con un haz láser

adicional resonante con alguna de las transiciones. Los átomos absorberán una parte de la luz de ese haz proyectando una “sombra” en el mismo. Utilizando un arreglo de lentes en configuración 4f es posible formar una imagen de dicha sombra en una cámara CCD a partir de la cual es posible extraer los parámetros físicos del gas.

5. Finalmente, el estudiante puede proceder con la caracterización de la MOT. Deberán realizarse las siguientes mediciones:
 - a) Número de átomos, densidad y temperatura de la MOT como función del gradiente magnético.
 - b) Número de átomos, densidad y temperatura de la MOT como función de la potencia de los haces de enfriamiento y rebombeo.
 - c) Número de átomos, densidad y temperatura de la MOT como función de la desintonía de la frecuencia de enfriamiento. El valor de esta desintonía puede variarse utilizando un modulador acusto-óptico

4. Materiales

1. Sistema de ultra alto vacío.
2. Láseres de diodo de cavidad extendida.
3. Arreglo de espectroscopia de absorción saturada.
4. Medidor de onda.
5. Analizador de polarización.
6. Medidor de potencia de la luz.
7. Bobinas.
8. Fuente de corriente estabilizada.
9. Sonda magnética de efecto Hall.
10. Cámara CCD.
11. Componentes ópticos diversos.
12. Modulador acusto-óptico de 80MHz con generador de radiofrecuencia.
13. Osciloscopio.
14. Analizador de espectros.

5. Habilidades adquiridas

El estudiante se familiarizará con dos importantes técnicas experimentales que constituyen la base de los experimentos de átomos fríos: las técnicas de captura magnética y enfriamiento láser (4). Para que éstas puedan ser correctamente implementadas se requiere que el estudiante adquiera una serie de conocimientos técnicos y conceptuales importantes.

Desde la perspectiva técnica, el estudiante estará expuesto a los diferentes componentes del sistema experimental. Por lo que tendrá oportunidad de aprender sobre el funcionamiento del sistema de ultra-alto vacío (6); aprenderá sobre el sistema óptico necesario para generar las frecuencias láser utilizadas en el experimento (7); se familiarizará con las técnicas de generación de campos magnéticos (7); aprenderá a utilizar el software de automatización del experimento; implementará la técnica de imagen por absorción óptica (5), y se familiarizará con el software de adquisición y análisis de imágenes.

Desde la perspectiva conceptual, el estudiante requerirá de un profundo conocimiento en física atómica básica (8), con especial énfasis en la interacción de átomos alcalinos con campos magnéticos externos y con radiación electromagnética. Específicamente, en esta práctica el estudiante podrá ver con toda claridad la estructura hiperfina del átomo de litio y cómo ésta se desdobra en presencia de campos magnéticos externos. Visualizará también el efecto de la radiación electromagnética al inducir transiciones ópticas entre los estados hiperfinos de este átomo y el papel que el efecto Doppler juega en las tasas de transición. Finalmente, el estudiante podrá aterrizar todos estos conocimientos técnicos y conceptuales en la implementación de técnicas específicas que permiten la captura y enfriamiento de la muestra atómica.

Parte II

Enfriamiento sub-Doppler

6. Antecedentes

El enfriamiento sub-Doppler fue descubierto por accidente por William D. Phillips en 1988 cuando se encontraba estudiando técnicas de enfriamiento láser y observó que la temperatura medida era mucho menor que los límites mínimos predichos por la teoría disponible hasta el momento (9). Más tarde, J. Dalibard y C. Cohen-Tannoudji lograron explicar estas observaciones al demostrar teóricamente la existencia de un mecanismo de enfriamiento adicional que involucraba la interacción de los átomos con gradientes de polarización en la luz láser utilizada para enfriarlos, un efecto que llamaron “Efecto Sísifo”, o bien, técnica de enfriamiento sub-Doppler debido a que hizo posible superar el límite Doppler impuesto anteriormente (10).

Hoy en día, numerosas técnicas de enfriamiento sub-Doppler han sido desarrolladas explotando varias configuraciones espectroscópicas. Estas técnicas han sido muy importantes en el proceso de enfriamiento necesario para la producción de gases cuánticos como es el caso de condensados de Bose-Einstein (2) y gases degenerados de Fermi (3).

Esta técnica funciona por medio de una combinación de dos efectos (11). Por un lado se tiene un enfriamiento por gradiente de polarización, o enfriamiento Sísifo, y por otro lado se tiene un mecanismo de “captura coherente por selección de velocidad” (en inglés conocido como “Velocity Selective Coherent Population Trapping” VSCPT) que proviene de la estructura “lambda” del sistema de tres niveles que se utiliza para implementar esta técnica.

7. Objetivos

1. Producir una trampa magneto-óptica compuesta por átomos de ${}^6\text{Li}$. Para este objetivo es obligatorio que el estudiante haya realizado previamente la primera parte de esta práctica impartida en este mismo curso de laboratorio.

2. Implementar la técnica de enfriamiento sub-Doppler por melaza óptica gris para enfriar por debajo del límite Doppler a los átomos previamente capturados en la trampa magneto-óptica.
3. Caracterizar el funcionamiento de esta técnica por medio de la medición de la temperatura y del número de átomos de la muestra como función de:
 - a) La desintonía de la frecuencia de los haces de enfriamiento y rebombeo, así como de la desintonía relativa entre éstos.
 - b) Potencia de los haces de enfriamiento y rebombeo.
 - c) Duración del proceso de melaza gris

8. Metodología

El estudiante comenzará familiarizándose con las técnicas y equipo necesarios por medio de la lectura de material seleccionado cuidadosamente para tal fin. Esto incluye dos documentos producidos en el laboratorio y un artículo científico que contienen una descripción exhaustiva de diferentes aspectos del sistema experimental utilizando en el enfriamiento sub-Doppler así como la caracterización de la técnica para el caso específico del que es la especie atómica que desea enfriarse (11).

El Laboratorio de Materia Ultrafría cuenta ya con un sistema experimental capaz de producir una trampa magneto-óptica compuesta por átomos de ${}^6\text{Li}$ en la que es posible implementar el enfriamiento sub-Doppler. Los pasos para realizar esta práctica son cinco y todos ellos involucran el uso apropiado del software de automatización del experimento:

1. Producción y optimización de una trampa magneto-óptica. En la realización de este paso se parte del supuesto de que el estudiante ya realizó en la primera parte de esta práctica impartida en este mismo curso de laboratorio, por lo que deberá aplicar los conocimientos obtenidos en dicha experiencia.
2. El segundo paso consiste en producir las frecuencias ópticas necesarias para excitar los niveles hiperfinos de la línea D1 del átomo de ${}^6\text{Li}$ e implementar el esquema de tres niveles en configuración lambda. Esto incluye preparar la técnica de espectroscopia por absorción saturada en una celda de vapor que será necesaria para generar las referencias de frecuencia que se utilizan para anclar el láser. Posteriormente deberá acoplar la luz en fibras ópticas que permitirán llevar la luz a la región en donde se encuentran los átomos. Finalmente, deberá alinear los haces láser en la configuración correcta.
3. El tercer paso consiste en implementar la secuencia temporal correspondiente en el programa de automatización del experimento. De manera breve esta secuencia consiste en lo siguiente:
 - a) Producción de la trampa magneto-óptica.
 - b) Apagado simultáneo de los campos magnéticos y de la luz de la trampa magneto-óptica.
 - c) Simultáneamente, encender la luz láser necesaria para implementar el enfriamiento sub-Doppler durante un tiempo que debe ser caracterizado.

- d) Producción de imágenes de la muestra en una cámara CCD utilizando la técnica de absorción óptica. La sincronización de estos últimos tres pasos debe hacerse en forma muy cuidadosa porque típicamente la duración de todo el proceso es del orden de 10^{-3} segundos.
4. Finalmente, el estudiante puede proceder con la caracterización del funcionamiento de la melaza gris. Para ello, deberán realizarse las siguientes mediciones:
- Número de átomos y temperatura como función de las desintonías absoluta y relativas de los haces de enfriamiento y rebombeo.
 - Número de átomos y temperatura como función de la potencia de los haces de enfriamiento y rebombeo.
 - Número de átomos y temperatura como función del tiempo durante el que la técnica es aplicada.

9. Materiales

- Sistema de ultra alto vacío.
- Láseres de diodo de cavidad extendida.
- Arreglo de espectroscopia de absorción saturada.
- Medidor de onda.
- Analizador de polarización.
- Medidor de potencia de la luz.
- Bobinas.
- Fuente de corriente estabilizada.
- Sonda magnética de efecto Hall.
- Cámara CCD.
- Componentes ópticos diversos.
- Osciloscopio.
- Analizador de espectros.

10. Habilidades adquiridas

El estudiante se familiarizará con una importante técnica experimental que forma parte de la “familia” de técnicas de enfriamiento láser: el enfriamiento sub-Doppler (12). En este caso, se implementará y caracterizará una técnica de enfriamiento sub-Doppler específica conocida como “melaza gris” (11).

Se asume que el estudiante ha realizado ya la primera parte de esta práctica impartida en este mismo curso de laboratorio avanzado, por lo que cuenta con los conocimientos necesarios para implementar una trampa magneto-óptica. En la presente práctica el estudiante adquirirá una serie de conocimientos técnicos y conceptuales adicionales a los adquiridos en la práctica mencionada anteriormente.

Desde la perspectiva técnica, el estudiante estará expuesto a los diferentes componentes del sistema experimental necesarios

para implementar la técnica de enfriamiento sub-Doppler. Por lo que tendrá oportunidad de aprender sobre el sistema óptico necesario para generar las frecuencias láser utilizadas en este experimento, en particular, se familiarizará con técnicas de espectroscopia de dos fotones (5) y adquirirá experiencia adicional en la manipulación de campos magnéticos.

Desde la perspectiva conceptual, el estudiante requerirá de un profundo conocimiento en física atómica básica (8), con especial énfasis en la interacción de átomos con radiación electromagnética. Específicamente, en esta práctica el estudiante podrá ver con toda claridad la estructura hiperfina del átomo de litio y cómo producir transiciones de dos fotones en un sistema de tres niveles.

Finalmente, el estudiante podrá consolidar todos estos conocimientos técnicos y conceptuales en la implementación de la técnica de enfriamiento sub-Doppler por melaza gris.

Referencias

- E. L. RAAB, M. PRETISS, A. CABLE, S. CHU, D. E. PRITCHARD, Trapping of neutral sodium atoms with radiation pressure, *Physical Review Letters* 59 (23) (1987) 2631–2634. doi:10.1103/PhysRevLett.59.2631.
- W. KETTERLE, D. S. DURFEE, D. M. STAMPER-KURN, Making, probing and understanding bose-einstein condensates, in: M. INGUSCIO, S. STRINGARI, C. WIEMAN (Eds.), *Bose-Einstein condensation in atomic gases*, Vol. 140 of *International School of Physics Enrico Fermi*, IOS Press, Varenna, 1999.
- M. Inguscio, W. Ketterle, C. Salomon, *S. italiana di fisica, Ultra-cold Fermi Gases: Proceedings of the International School of Physics Enrico Fermi*, Course CLXIV, [held In] Varenna on Lake Como, Villa Monastero, 20-30 June 2006, *International School of Physics Enrico Fermi*, IOS Press, 2007.
- H. J. METCALF, P. VAN DER STRATEN, *Laser cooling and trapping*, Graduate texts in contemporary physics, Springer-Verlag GmbH, New York, 1999.
- W. DEMTRÖDER, *Laser spectroscopy*, Fortschritte der Chemie, Physik und physikalischen Chemie, Springer, 1971.
- E. IBARRA, Diseño de los sistemas de ultra-alto vacío y de control para experimentos con gases ultrafríos de litio (2016).
- E. CARRO, Diseño y proyección de trampas magnéticas y ópticas para experimentos con gases ultrafríos de litio. (2016).
- B. BRANSDEN, C. JOACHAIN, T. PLIVIER, *Physics of Atoms and Molecules*, Pearson Education, Prentice Hall, 2003.
- P. D. LETT, R. N. WATTS, C. I. WESTBROOK, W. D. PHILLIPS, P. L. GOULD, H. J. METCALF, Observation of atoms laser cooled below the doppler limit, *Phys. Rev. Lett.* 61 (1988) 169–172. doi:10.1103/PhysRevLett.61.169.
- J. DALIBARD, C. COHEN-TANNOUDJI, Dressed-atom approach to atomic motion in laser light: the dipole force revisited, *Journal of Optical Society of America B* 2 (11) (1985) 1707–1720. doi:10.1364/JOSAB.2.001707.
- A. BURCHIANTI, G. VALTOLINA, J. A. SEMAN, E. PACE, M. DE PAS, M. INGUSCIO, M. ZACCANTI, G. ROATI, Efficient all-optical production of large ^6Li quantum gases using D_1 gray-molasses cooling, *Phys. Rev. A* 90 (2014) 043408. doi:10.1103/PhysRevA.90.043408.
- P. BERMAN, V. MALINOVSKY, *Principles of Laser Spectroscopy and Quantum Optics*, Princeton University Press, 2010.