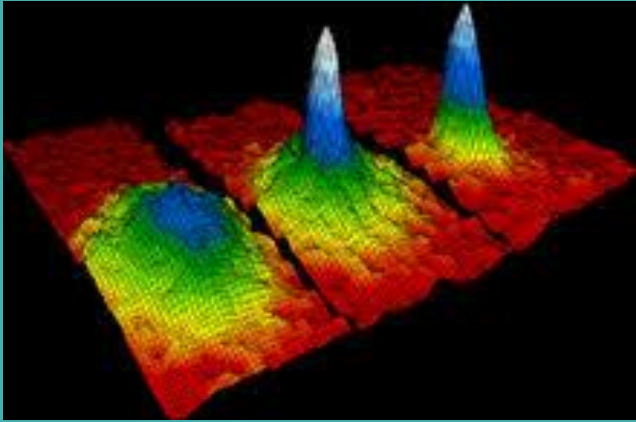




ENFRIAMIENTO LÁSER

Facultad de Ciencias - Universidad Autónoma de México

Alumno: Sebastián González Juárez

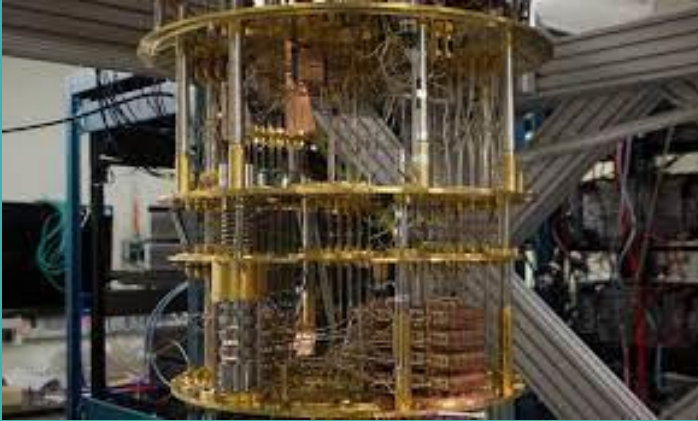


INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIONES

El enfriamiento por láser, también conocido como **refrigeración óptica**, se utiliza para reducir la energía térmica de átomos, iones o partículas en un sistema físico, logrando temperaturas cercanas al cero absoluto.

Las motivaciones para enfriar átomos a estas temperaturas son:

- Observación de Estados Cuánticos Puros
- Creación de Condensados de Bose-Einstein (BEC)
- Mejora de la Precisión en Relojes Atómicos
- Estudio de la Superfluidez y la Superconductividad
- Desarrollo de la Computación Cuántica



El Premio fue otorgado a **Steven Chu**, **Claude Cohen-Tannoudji** y **William D. Phillips** por sus investigaciones sobre el enfriamiento y la captura de átomos mediante láser.

- **Contribuciones de cada galardonado:**

1. **Steven Chu:** Desarrolló técnicas avanzadas para enfriar y atrapar átomos con láser, utilizando lo que se conoce como una "melaza óptica", donde los átomos pierden energía y se ralentizan al interactuar con la luz láser.
2. **Claude Cohen-Tannoudji:** Mejoró y extendió los métodos de enfriamiento láser, refinando las técnicas que permitieron manipular átomos a temperaturas extremadamente bajas.
3. **William D. Phillips:** Desarrolló un método de enfriamiento láser que logró temperaturas incluso más bajas de lo que se creía posible, superando los límites previos en la captura de átomos.



Steven Chu

Claude Cohen-Tannoudji

William D. Phillips

PREMIO NOBEL DE FÍSICA EN 1997

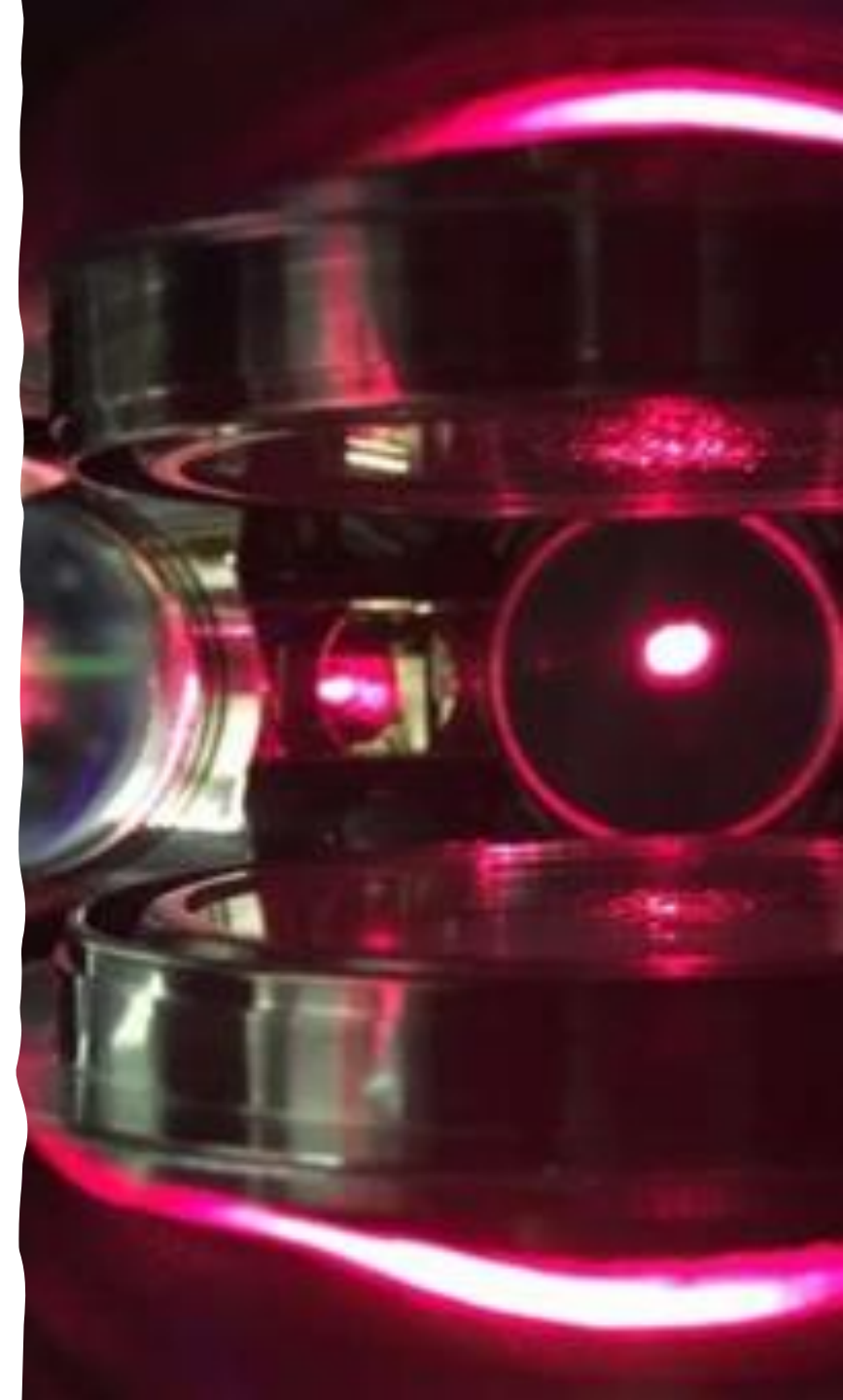
TÉCNICAS DE ENFRIAMIENTO LASER

Las primeras técnicas de enfriamiento doppler son:

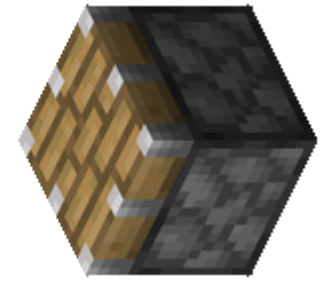
- La Melaza óptica.
- Trampa Magneto-óptica (MOT).

Otros métodos avanzados:

- Enfriamiento Sisbarranco (Sisyphus Cooling).
- Enfriamiento de bandas laterales resueltas
- Enfriamiento Raman
- VSCPT
- Enfriamiento mediante cavidad
- Empleo de un ralentizador Zeeman
- Transparencia inducida electromagnéticamente



VELOCIDAD Y TEMPERATURA



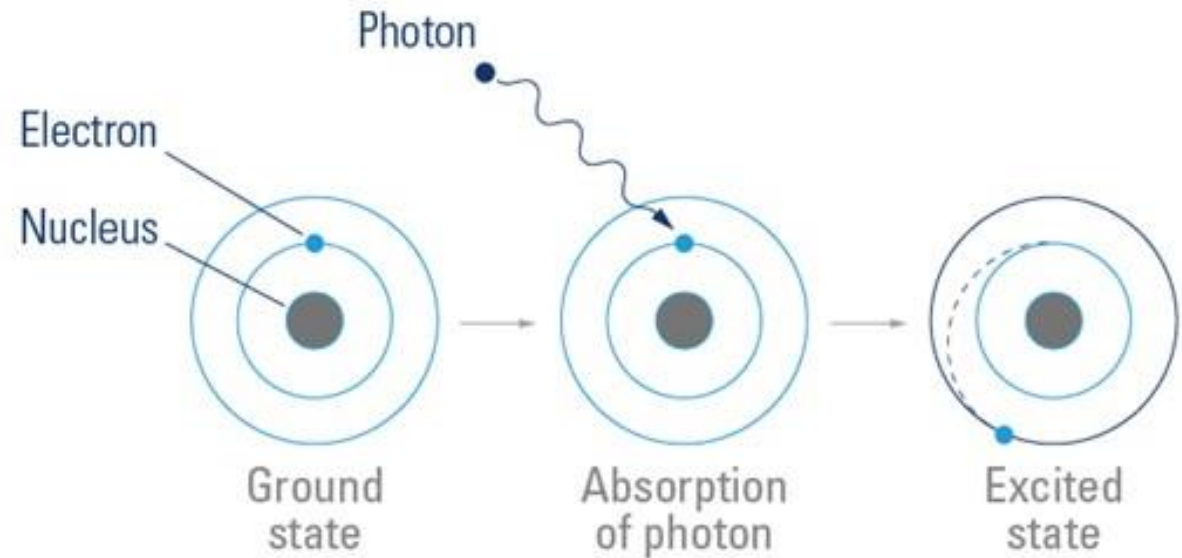
Para enfriar los átomos, se busca que tengan poco movimiento, pues tenemos una **“relación temperatura - velocidad”**.

Las partículas con mayor energía cinética **elevan** la temperatura, mientras que las que tienen menor energía cinética la **disminuyen**.

La idea es **disminuir** la velocidad promedio de los átomos. Esto se logra aprovechando el **efecto Doppler** y la **interacción de los átomos con luz láser**.

Podemos generar un entorno controlado en el que los átomos quedan confinados espacialmente, restringiendo sus grados de libertad de movimiento, lo que a su vez contribuye a **reducir su velocidad promedio** y, por ende, su energía cinética.

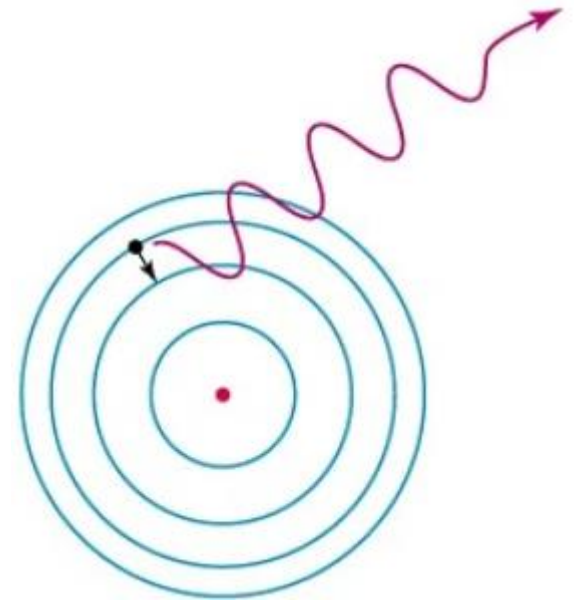
INTERACCIÓN LUZ ÁTOMOS. ABSORCIÓN



- Sabemos que los electrones en un átomo no pueden tener cualquier energía, sus energías están restringidas a **valores discretos**.
- Para la absorción, la energía del fotón debe coincidir exactamente con la diferencia de energía entre dos niveles cuánticos del átomo: $h\nu = E_f - E_i$, h es la constante de Planck y ν la frecuencia de la luz.
- Si la energía del fotón no satisface esta condición, el átomo **no absorberá la luz**.

INTERACCIÓN LUZ ÁTOMOS. EMISIÓN

- Los estados excitados son **inestables**, por lo que el electrón tiende a regresar al estado fundamental.
- Cuando el electrón transita, el átomo emite un fotón cuya energía es exactamente igual a la diferencia de energía.
- El fotón se emite en una **dirección aleatoria**, ya que no hay preferencia por un eje



EFFECTO DOPPLER

- Es un **cambio aparente en la frecuencia** de una onda debido al movimiento relativo entre la fuente y el observador.
- Si la fuente se acerca al observador, la frecuencia percibida **aumenta**, y si se aleja, la frecuencia **disminuye**.
- Este fenómeno aplica tanto a ondas de sonido como a ondas electromagnéticas, como la luz.
- Cuando el átomo está en movimiento, entonces por el efecto Doppler, este átomo "**ve**" una frecuencia ligeramente **diferente** a la de los fotones incidentes.
- Utilizando unos cuantos haces en direcciones opuestas, es posible parar el movimiento de los átomos.

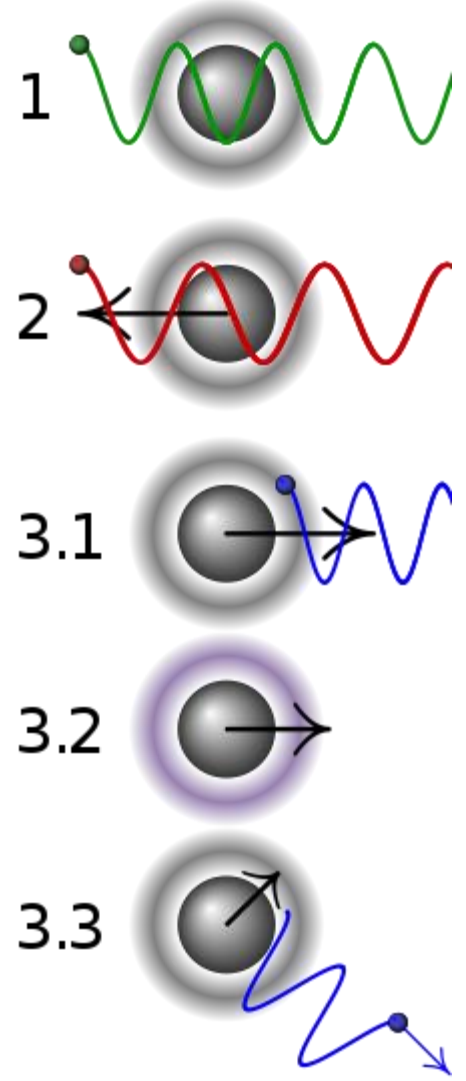
1. Un átomo estacionario no ve el láser ni desplazado al rojo ni al azul y no absorbe el fotón.

2. Un átomo moviéndose respecto al láser lo ve desplazado al rojo y no absorbe el fotón.

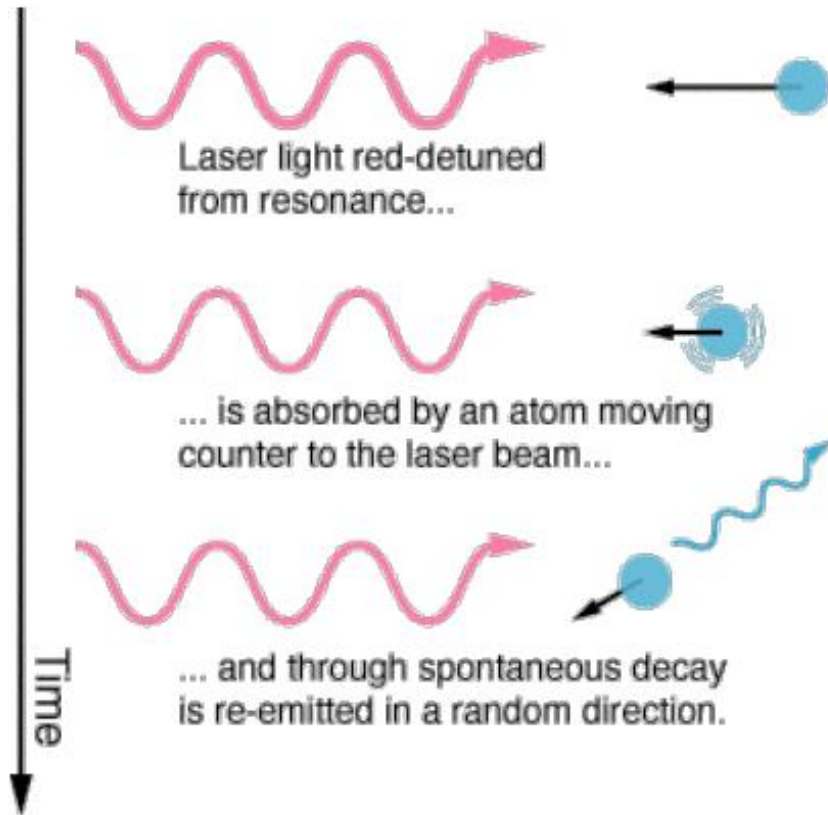
3.1. Un átomo moviéndose hacia el láser lo ve desplazado al azul y absorbe el fotón, frenando el átomo.

3.2. El fotón excita el átomo, moviendo un electrón a un estado cuántico superior.

3.3. El átomo reemite un fotón. Dado que su dirección es aleatoria, no cambio neto en la cantidad de movimiento considerando muchos átomos.



RELACIÓN: LÁSERES - EFECTO DOPPLER - ÁTOMOS



- La frecuencia del haz láser se elige de manera que sea muy próxima a la frecuencia de absorción del átomo, pero **no idéntica a ésta**.
- Cada vez que el átomo comienza a moverse hacia a uno de los haces láser, el efecto Doppler provoca que la radiación del haz sea absorbida por el átomo, y éste retorne a su sitio.

TEMPERATURA MÍNIMA. TEMPERATURA DOPPLER



Se tiene una **temperatura límite** para el enfriamiento Doppler, la temperatura mínima alcanzable está dada por: $T_{Doppler} = \frac{\hbar\gamma}{2k_B}$

donde: \hbar es la constante de Planck reducida, γ el ancho natural de la línea de transición atómica y k_B constante de Boltzmann.

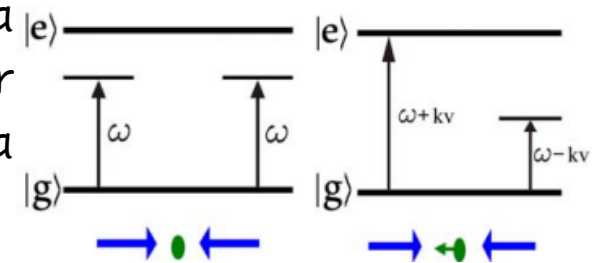
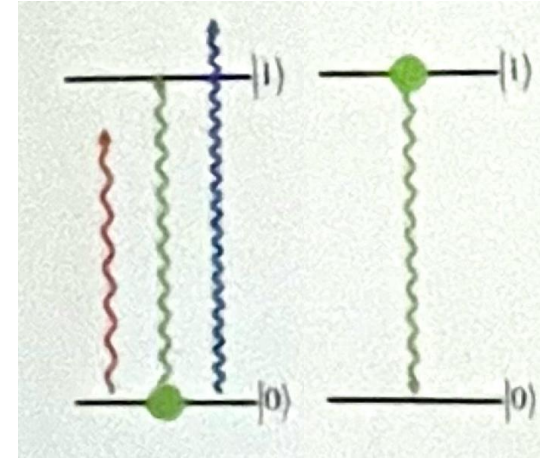
Se **limita la cantidad de energía cinética** que se puede extraer de los átomos.

Las **órdenes de magnitud son superiores a las necesarias** para observar fenómenos cuánticos colectivos, como la condensación de Bose-Einstein o el comportamiento de gases degenerados de fermiones.

Se han alcanzado **temperaturas inferiores** al límite Doppler utilizando métodos más avanzados de enfriamiento láser: enfriamiento Sisyphus, por evaporación, de banda lateral resuelta.

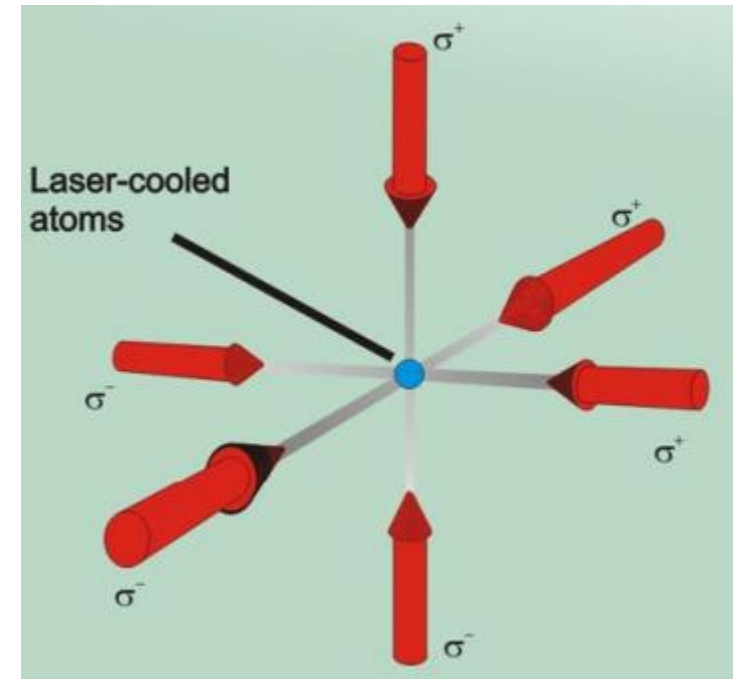
ENFRIAMIENTO DE ÁTOMOS CON LÁSER (RECAPITULACIÓN DE IDEAS)

1. Al aplicar luz de dos direcciones opuestas, los átomos absorberán más fotones del haz láser que apunta en sentido opuesto a su movimiento.
2. En cada proceso de absorción, el átomo pierde cantidad de movimiento igual al momento del fotón.
3. En la emisión de un fotón, este es expelido con la misma cantidad de movimiento, pero en una dirección aleatoria.
4. El cambio de cantidad de movimiento inicial es una pérdida pura opuesta al movimiento del átomo, mientras que el cambio por emisión es aleatorio. Esto da como resultado una reducción de la velocidad del átomo.
5. Si la absorción y emisión de fotones se repiten muchas veces, la velocidad media del átomo, y por tanto su energía cinética, disminuyen.



MELAZA ÓPTICA (OPTICAL MOLASSES)

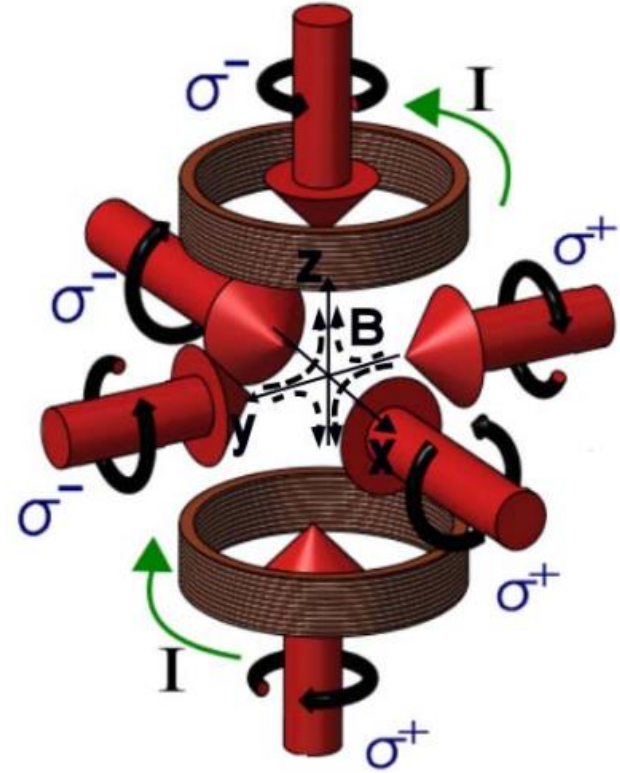
- Método desarrollado en 1985 por **Steven Chu** y colaboradores en AT&T Bell Laboratories.
- Se usan **tres pares** de rayos láser **contrapropagantes** en **tres ejes** (configuración 3D).
- Los fotones ejercen presión de radiación sobre los átomos, reduciendo su velocidad al **absorber** fotones de los haces opuestos al movimiento de los átomos.
- La melaza óptica **no confina** espacialmente los átomos, solo reduce su energía cinética.
- Este método se **combina** frecuentemente con otros, como trampas magnéticas, para mantener los átomos en posición mientras se enfrían aún más.



Átomos más lentos son más fáciles de manipular y atrapar

TRAMPA MAGNETO-ÓPTICA (MOT)

- Se emplea un campo magnético no uniforme creado por un par de bobinas en configuración **anti-Helmholtz**.
- Este campo tiene un gradiente que **varía con la posición**: el campo es **nulo en el centro** y **aumenta** cuando se alejan del centro.
- Esto genera un efecto de posición-dependencia en la frecuencia de resonancia de los átomos debido al efecto Zeeman, lo que cambia la frecuencia de resonancia del átomo localmente, permitiendo que el sistema ajuste el enfriamiento mediante láseres sintonizados.
- Los átomos desplazados del centro de la trampa perciben un campo magnético **mayor** y una frecuencia de resonancia **modificada**.
- La MOT **combina** las **fuerzas** de freno de la **melaza óptica** con un **campo magnético gradiente** para confinar y enfriar átomos en una región definida.



Igual que en la melaza óptica, tres pares de láseres contrapuestos

OTROS MÉTODOS AVANZADOS

Método de Enfriamiento	Descripción	Mecanismo Principal
Enfriamiento Sisbarranco (Sisyphus Cooling)	Crea una "red" de potenciales para los átomos. Los átomos pierden energía cinética a medida que se mueven a través de los valles y picos del potencial óptico.	La interacción de los átomos con un campo de láser en una red de potenciales ópticos, lo que reduce su velocidad y temperatura.
Enfriamiento de Bandas Laterales Resueltas	Se utiliza láseres que están afinados a frecuencias muy precisas para enfriar átomos a temperaturas muy bajas. Es eficaz en sistemas cuánticos donde las transiciones energéticas son claras.	Los átomos son enfriados mediante la absorción y emisión de fotones en líneas de absorción muy específicas, reduciendo su velocidad.
Enfriamiento Raman	Utiliza dos láseres con frecuencias diferentes para inducir transiciones Raman en los átomos, lo que permite enfriar los átomos mediante la absorción de fotones.	El átomo absorbe un fotón de un láser y emite otro fotón en un proceso Raman, perdiendo energía.
VSCPT (Velocity-Selective Coherent Population Trapping)	Método que utiliza la interferencia cuántica para enfriar átomos seleccionando aquellas partículas que tienen ciertas velocidades, atrapándolas en un estado coherente.	Un láser de alta intensidad induce un estado cuántico de interferencia, donde solo los átomos con ciertas velocidades son atrapados.
Enfriamiento mediante Cavidad	Se utiliza una cavidad óptica para confinar la luz y aumentar la interacción con los átomos, lo que genera una mayor disipación de energía y reduce la temperatura.	La interacción de los átomos con la luz confinada en una cavidad óptica mejora la transferencia de energía.
Empleo de un Ralentizador Zeeman	Utiliza un campo magnético en combinación con láseres para ralentizar los átomos. Los átomos que se mueven hacia el campo magnético pierden energía cinética al interactuar con el láser.	Los átomos experimentan un cambio en la frecuencia resonante debido al efecto Zeeman, lo que genera una desaceleración.
Transparencia Inducida Electromagnéticamente (EIT)	Utiliza un campo láser para inducir una condición de transparencia en un medio, lo que puede ser aprovechado para enfriar átomos mediante el control de la interacción con la luz.	Se usa la interferencia cuántica para crear condiciones de transparencia, lo que permite reducir la velocidad de los átomos.

LABORATORIO DE ÁTOMOS FRÍOS Y ÓPTICA CUÁNTICA DEL IF-UNAM

Objetivos:

1. Implementar técnicas para enfriar átomos a temperaturas cercanas a $1 \mu\text{K}$, controlando sus grados de libertad internos y externos.
2. Usar átomos fríos y referencias ópticas para crear, estudiar e inducir fenómenos como memorias y correlaciones cuánticas entre átomos y fotones.
3. Crear un entorno de aprendizaje donde estudiantes e investigadores jóvenes adquieran experiencia en tecnologías esenciales (vacío, láser, control óptico) para realizar experimentos en átomos fríos y óptica cuántica.



NUBE DE ÁTOMOS DE RUBIDIO ATRAPADA POR HACES DE LUZ

Se tiene una **trampa magneto-óptica** para átomos de **rubidio**.

Injectaron un gas caliente de rubidio atómico en la cámara de vacío, encendieron los láseres y el campo magnético.

Se obtuvo una **nube** de átomos de rubidio **atrapada** por haces de luz bien controlados.

REFERENCIAS

- *Laboratorio de Átomos Fríos y Óptica Cuántica*. (2024). Unam.mx.
<https://laboratorios.fisica.unam.mx/objectives?id=17>
- The Nobel Prize in Physics 1997. (2024). NobelPrize.org.
<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1997/advanced-information/>
- De Divulgación, A., & Ibarra -Durán, A. (n.d.). POR DEBAJO DEL LÍMITE DOPPLER: EL ENFRIAMIENTO SÍSIFO. 7, 1. Retrieved November 11, 2024, from <https://up-rid.up.ac.pa/806/1/Tecnociencia%20Articulo%2011%207%281%29%2005.pdf>
- Zimmerman, G. (1995). Library of Congress Cataloging in Publication Program. Publishing Research Quarterly, 11(3), 164–165. <https://doi.org/10.1007/bf02680460>
- Supérieure, N., Paris, D., & Phillips, W. (n.d.). Physics 41N Mechanics: Insights, Applications and Advances Lecture 6: Laser Cooling of Atoms. <https://web.stanford.edu/~rpam/dropoff/Phys041N/lecture6-lasercooling.pdf>
- (2017). Instituto de Física - UNAM, México.
<https://www.fisica.unam.mx/organizacion/comunicacion/noticia.php?id=1556&?lang=es>