

# TIEMPO Y MATERIA ULTRAFRÍA

*J. M. López Romero, E. de Carlos López, S. López López, M. Talavera Ortega*

Centro Nacional de Metrología

Área de Metrología

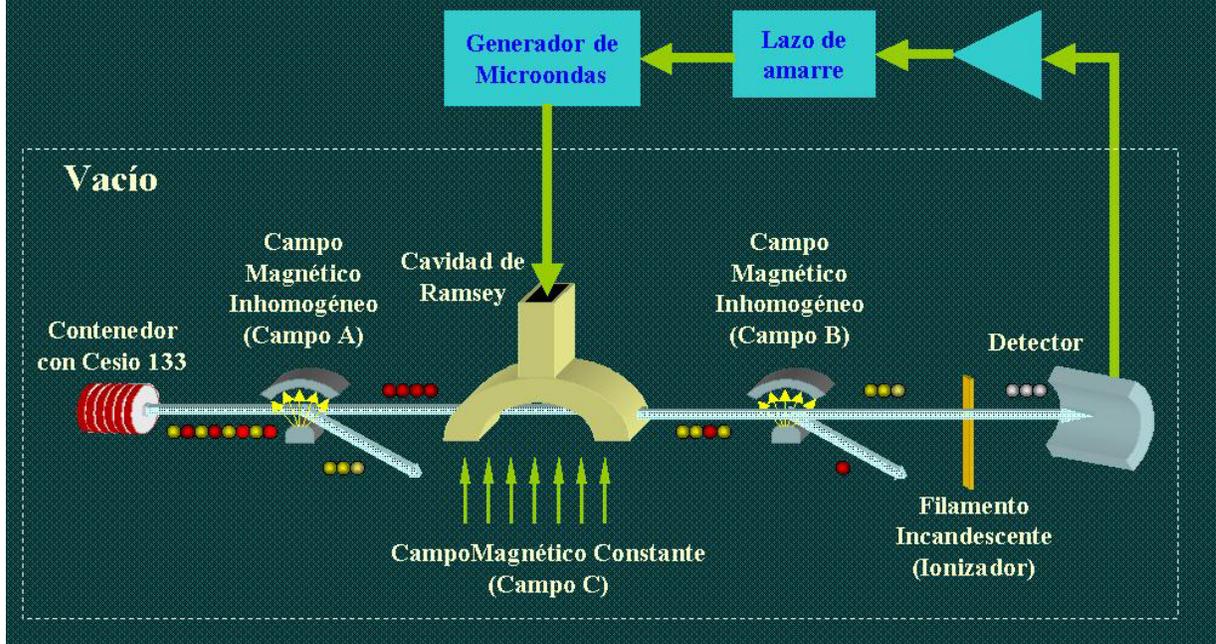
División de Tiempo y Frecuencia

La combinación de los efectos debidos a la reducción de los anchos de línea de emisión de láseres por debajo de 1 MHz y a la estabilización de frecuencia a referencias ultraestables, que pueden ser sistemas atómicos como los utilizados en la espectroscopia de saturación, hace posible la generación de haces de luz altamente monocromáticos y de muy alta estabilidad en frecuencia. Bajo estas condiciones, los láseres se aproximan a ser fuentes de luz ideales. En las últimas dos décadas estas fuentes de luz casi ideales se han utilizado para obtener lo que se ha dado por llamar átomos ultrafríos. Particularmente, la obtención de gases ultrafríos de Cesio-133 cuya temperatura es tan baja como 1 mK sobre el cero absoluto, o menor, es posible utilizando láseres semiconductores estabilizados a la línea D2 del Cs-133. Entre las mayores motivaciones en el desarrollo de estos experimentos con átomos ultrafríos ha sido la posibilidad de medir el tiempo con exactitudes sin precedentes, del orden de partes en  $10^{16}$ , o mejor, y así crear nuevos relojes atómicos que permitan mejoras considerables en diversos campos ciencia y tecnología, entre ellos: las telecomunicaciones, la navegación, la metrología e investigación básica. El Centro Nacional de Metrología (CENAM) desarrolla un reloj atómico que utiliza técnicas de enfriamiento de gas de Cesio-133 con luz con el objeto de realizar experimentalmente la definición de la unidad de tiempo del Sistema Internacional de unidades, el segundo, con incertidumbre de medición no mayor a 2 partes en  $10^{15}$ . Este reloj atómico necesitaría operar por más de 10 millones de años para acumular un segundo de error.

La obtención de temperaturas por debajo del límite Doppler en un gas monoatómico, digamos Cesio-133, es posible debido a un mecanismo en el cual se combinan los fenómenos de bombeo óptico y efecto Stark. Esta combinación de fenómenos se logra cuando el gas monoatómico está embebido en una onda estacionaria de radiación electromagnética de la frecuencia adecuada con un gradiente de polarización muy severo en donde la polarización cambia ocho veces en una longitud de onda.

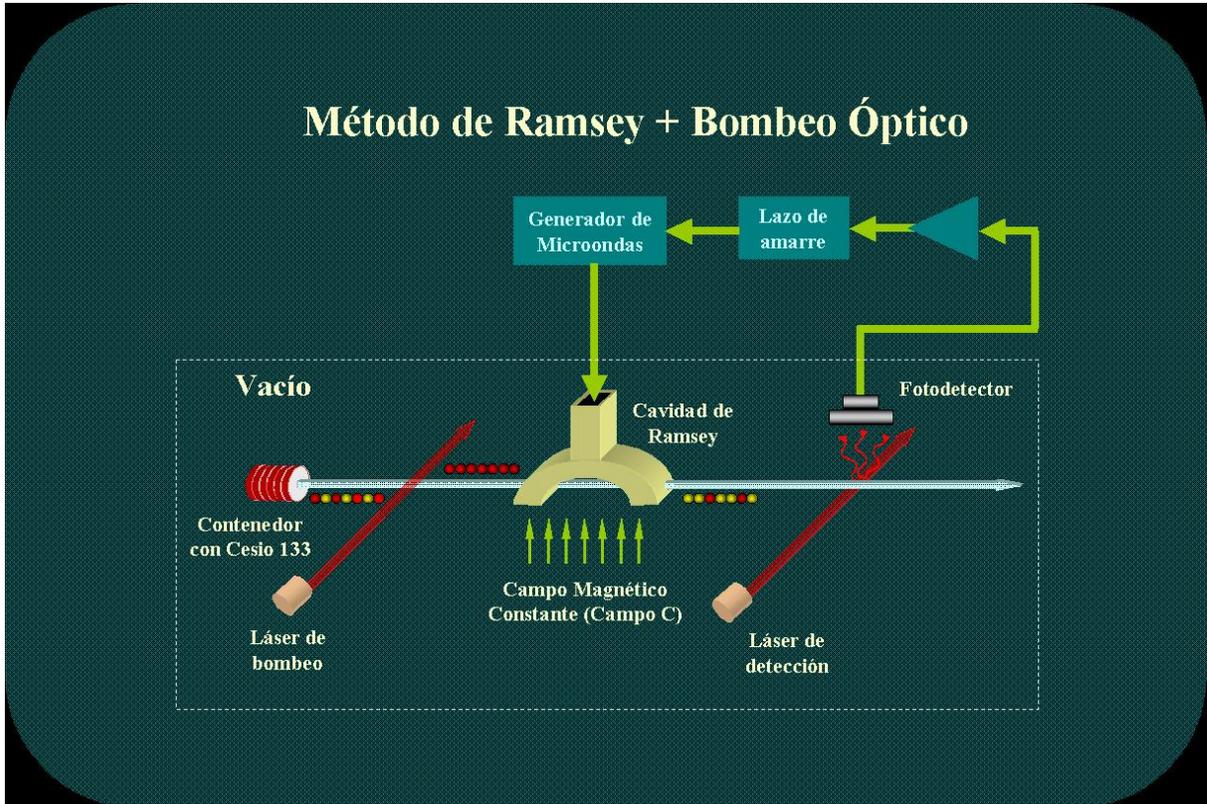
El desarrollo de este reloj atómico de átomos ultrafríos en el CENAM permitirá a México contar con una de las mejores referencias de tiempo del mundo. Este patrón de medición de tiempo apoyará al sector de las telecomunicaciones en donde se requiere la medición de tiempo de muy alta exactitud para mantener en operación apropiadas redes complejas de comunicación. Así mismo, este artefacto será usado en la generación de la hora oficial de este país la cual es generada en el CENAM.

# Método de Ramsey



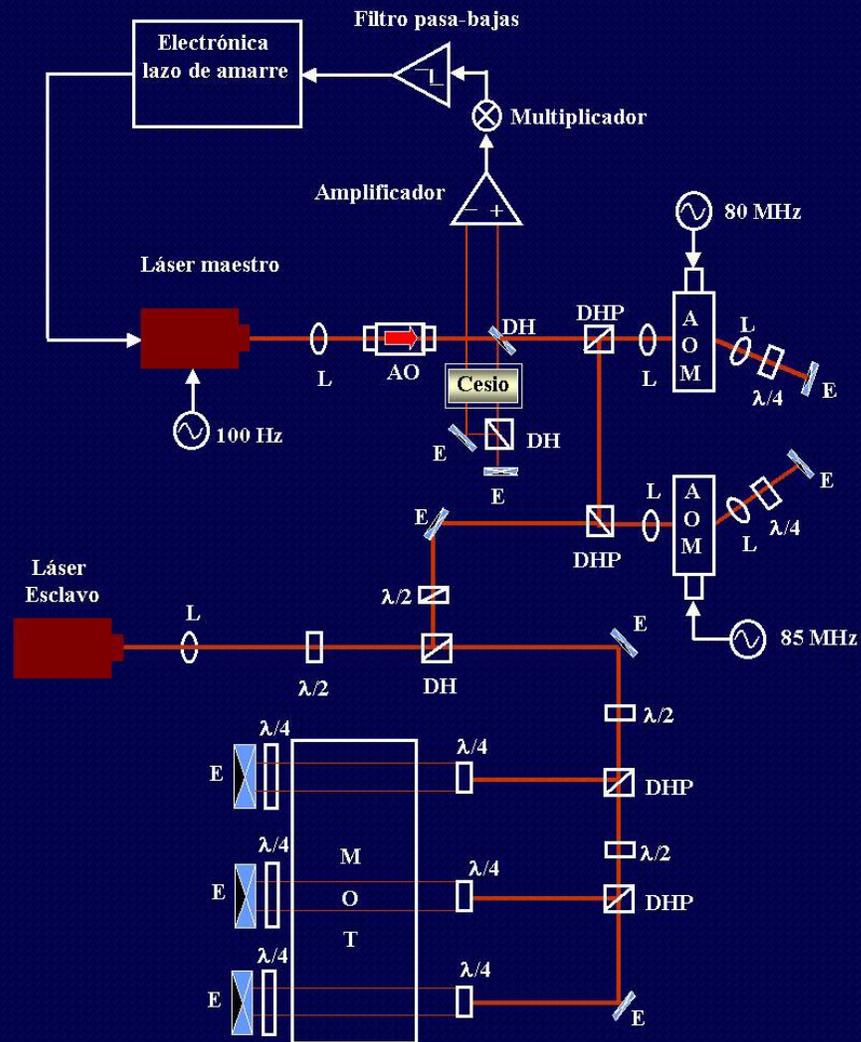
Experimento con haces térmicos de Cesio-133 con selección magnética para el estudio de la estructura hiperfina del átomo de Cesio-133. Este experimento es usado en la operación de relojes atómicos de Cesio-133. El ancho de línea de la resonancia está entre 50Hz y 1kHz, éste constituye la principal limitante para mejorar la exactitud en la medición de tiempo con esta tecnología.

## Método de Ramsey + Bombeo Óptico



Experimento con haces térmicos de Cesio-133 bombeado ópticamente. Este experimento es usado en la operación de relojes atómicos de Cesio-133. El ancho de línea de la resonancia es similar al obtenido con los métodos de selección magnética pero se mejora considerablemente el cociente señal/ruido lo que conduce a su vez a un mejoramiento de la estabilidad de los relojes atómicos que operan bajo este principio.

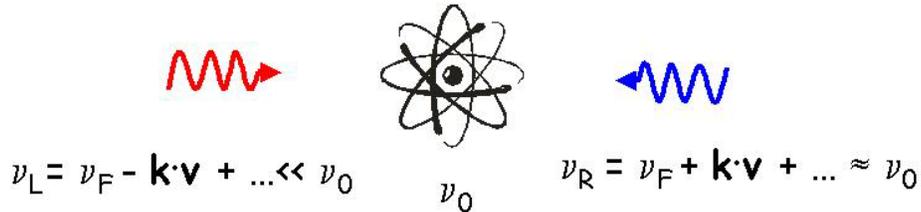
## Arreglo óptico utilizado para inyectar la luz a la trampa magneto-óptica



Arreglo experimental para la producción de fotones en la trampa magneto-óptica (MOT) del CENAM.

# Enfriamiento Doppler

Marco de referencia del átomo

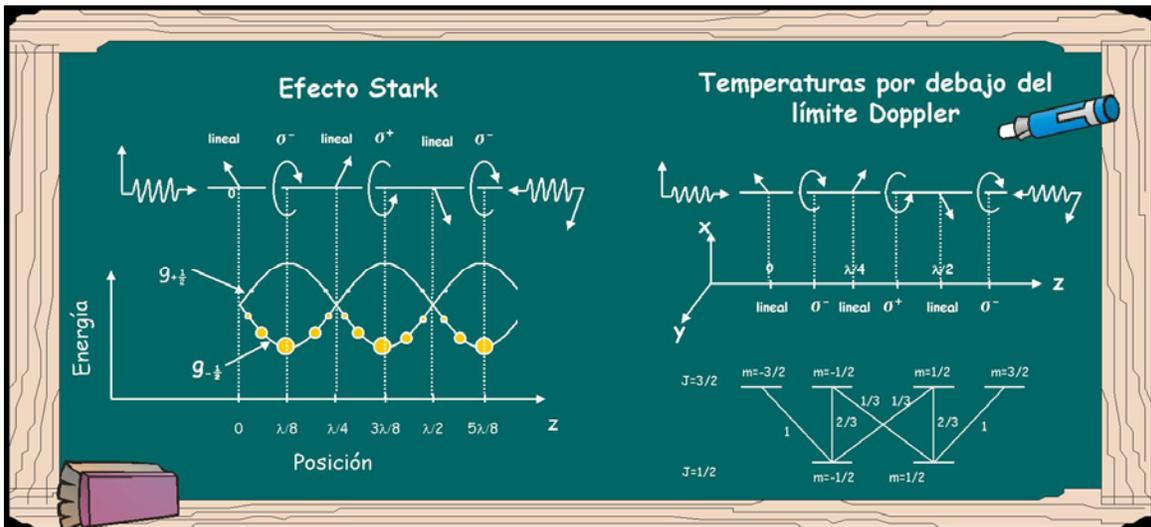


$$\omega_{abs} \cong \omega_0 + \mathbf{k} \cdot \mathbf{v} - \frac{1}{2} \omega_0 \left( \frac{v}{c} \right)^2 + \frac{\hbar \omega_0^2}{2Mc^2} + \dots$$

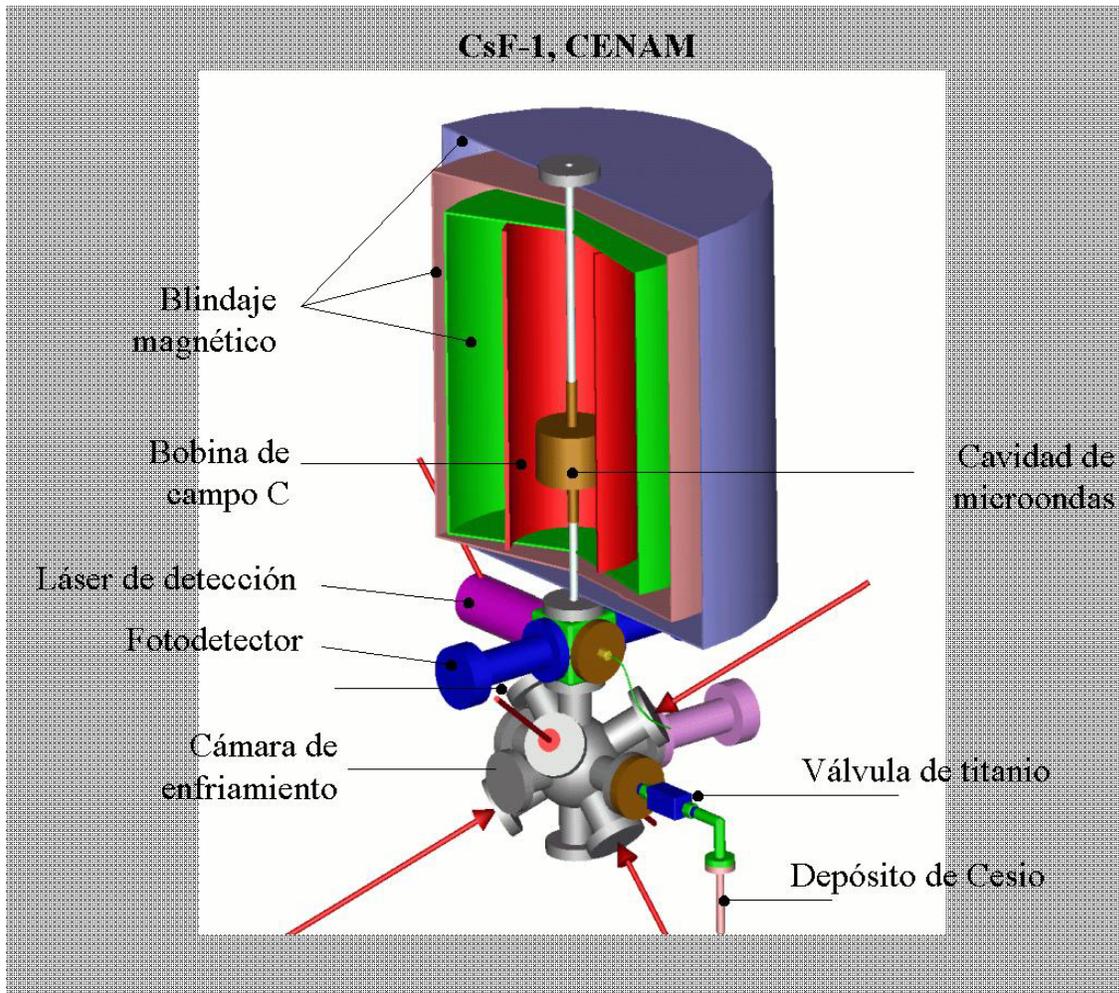
$$\mathbf{F} = \frac{d}{dt} \mathbf{p} = \hbar \frac{\Gamma}{2} \mathbf{k}$$

Fuerza sobre el átomo como resultado del proceso de absorción/emisión de un fotón

Los fotones, que en el marco de referencia del laboratorio tienen una frecuencia corrida ligeramente hacia bajas frecuencias respecto de la resonancia, son percibidos por el átomo con distintas frecuencias debido al efecto Doppler. La probabilidad de interacción átomo-fotón es mucho mayor para aquellos fotones que se desplazan en dirección opuesta a la del átomo.



La obtención de temperaturas por debajo del límite Doppler en un gas monoatómico, digamos Cesio-133, es posible debido a un mecanismo en el cual se combinan los fenómenos de bombeo óptico y efecto Stark. Esta combinación de fenómenos se logra cuando el gas monoatómico está embebido en una onda estacionaria con un gradiente de polarización muy severo, la polarización cambia ocho veces en una longitud de onda.



La producción de átomos ultrafríos de Cesio-133 en el CENAM serán usados en la operación de un reloj atómico de muy alta exactitud, denominado Fuente Atómica (CsF-1).