

EXPERIMENTOS DE MANIPULACIÓN DE ÁTOMOS CON LUZ EN EL CENAM PARA ESTABLECER UN NUEVO PATRÓN PRIMARIO DE FRECUENCIA

I. Domínguez L.¹, J. M. López R.¹, H. Ramírez R.¹, E. de Carlos L.², y S. López L.¹
¹Centro Nacional de Metrología (CENAM), Área Eléctrica, División de Tiempo y Frecuencia
km 4,5 Carretera a Los Cués, Municipio El Marqués, 76241, Querétaro, México
Tel. (4) 211-0500 ext. 3205, Fax (4) 211-0548
Dirección electrónica: idingu@cenam.mx
²Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Facultad de Ciencias
Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, Cuernavaca 62210, Morelos, México
Tel (7) 329-7020

Resumen: Con el objeto de establecer un nuevo patrón primario de frecuencia para asegurar la reproducción de la unidad de tiempo, el segundo, con una exactitud de partes en 10^{15} , el Centro Nacional de Metrología desarrolla una serie de experimentos de manipulación de átomos de Cesio-133 con luz para confinar del orden de 10^8 átomos de Cesio en volúmenes de 5 mm^3 a temperaturas de 3 mK sobre el cero absoluto, experimentos conocidos genéricamente con el nombre de átomos fríos. En este trabajo se presentan los principios físicos en los cuales se basan estos experimentos, se hace especial énfasis en los retos experimentales para lograr el enfriamiento. Así mismo se exponen los avances del proyecto de construcción del patrón primario de frecuencia de átomos fríos del CENAM

INTRODUCCIÓN

Durante siglos, la rotación de la Tierra proporcionó la mejor manera de medir tiempo. Los sistemas de comunicación no requerían de un alto nivel de exactitud y por lo tanto la periodicidad de los movimientos terrestres cubría las necesidades metrológicas de la sociedad. Sin embargo, a mediados del siglo XX, fue posible demostrar que los patrones para medir tiempo fundamentados en propiedades atómicas descubiertas por la Mecánica Cuántica podrían ser más exactos que la referencia con la que se contaba hasta entonces. Aunado a esto, el desarrollo tecnológico en los medios de transporte y de comunicación en general comenzó a exigir mejores patrones para medir tiempo y frecuencia. Fue por esta razón que en 1967, se definió a la unidad para medir tiempo, el segundo, como la duración de $9\ 192\ 631\ 770$ periodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado base del átomo de Cesio-133. Los equipos experimentales con los que se reproduce la unidad de tiempo a partir de esta definición se conocen como relojes atómicos y estos son conocidos dentro de la Metrología como Patrones Primarios de Tiempo.

Desde su aparición, los relojes atómicos han estado en continua evolución, la meta ha sido siempre reproducir la unidad de tiempo con la mayor exactitud posible. Actualmente los relojes atómicos más precisos del mundo son los que se conocen como relojes de fuente atómica.

ANTECEDENTES

El principio físico con el que operan los relojes atómicos es la cuantización de la energía. En un átomo, los niveles de energía que cada uno de los electrones puede ocupar, se encuentran cuantizados, esto significa que solamente existen ciertos valores de energía que los electrones pueden ocupar, para que estos cambien de nivel, se requiere de emisión o absorción de energía. Una de las formas en que este intercambio ocurre es de manera radiativa, es decir, el proceso consiste en la emisión o absorción de radiación electromagnética, esta radiación tiene asociada una frecuencia f . La mecánica cuántica establece que la relación entre la energía E y la frecuencia f es

$$E = h f \quad (1)$$

Donde h es la constante de Planck. Si denotamos por E_1 y E_2 a las energías asociadas a dos niveles diferentes, tal que E_2 es mayor que E_1 , entonces la relación entre la frecuencia f_0 de la radiación electromagnética emitida al ir el electrón de E_2 a E_1 se escribe como

$$E_2 - E_1 = h f_0 \quad (2)$$

Esto quiere decir que si se hace incidir radiación de frecuencia f_0 sobre el átomo, se observará una resonancia, ésta tiene un ancho Δf cuyo valor mínimo esta dado por la relación de incertidumbre de Heisenberg

$$\Delta f \cdot \Delta t \approx 1 \quad (3)$$

donde Δt es la duración práctica de la observación de la transición.

El átomo de cesio, al igual que todos los átomos alcalinos, cuenta con un electrón fuera de las capas cerradas o llenas, este electrón puede alinear su espín de dos formas en el campo magnético del núcleo y a cada una corresponde una energía diferente. A esto se le conoce como el desdoblamiento hiperfino del estado base. En la figura 1 se presenta un diagrama de los primeros niveles de energía del Cs-133. La separación entre niveles se muestra, de acuerdo con la Ecuación (2), en términos de las frecuencias de la radiación involucrada en cada transición.

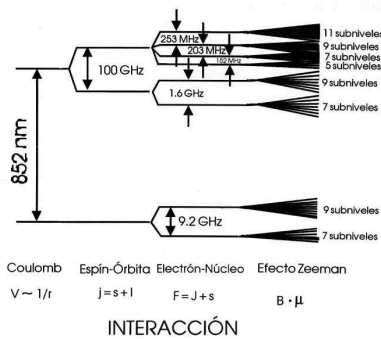


Figura 1. Niveles de menor energía en el átomo de Cesio-133. En la parte inferior se muestran los dos niveles hiperfinos del estado base con una separación equivalente en frecuencia de ≈ 9.2 GHz, ésta transición es en la que se define el segundo como unidad de tiempo.

Los relojes atómicos se pueden clasificar, de acuerdo a la velocidad con que se mueven los átomos de Cs en dos categorías: relojes atómicos de haz térmico y fuentes atómicas. La primer categoría se puede subdividir de acuerdo al método empleado para seleccionar el estado o nivel energético de los átomos en: relojes de selección magnética y relojes de bombeo óptico.

A continuación se describirá el funcionamiento de un reloj atómico de haz térmico para los dos subtipos existentes.

La figura 2 muestra esquemáticamente un reloj de haz térmico con los 5 elementos fundamentales que lo forman.

1.- Un horno en el que se tiene cesio a una temperatura aproximada de 100°C , a esta temperatura se genera suficiente presión de vapor de átomos de Cs tal que, si las condiciones de vacío son adecuadas puede formarse un haz térmico en el que los átomos se moverán a velocidades del orden de 200 m/s.

2.- Un sistema de vacío, el cual debe garantizar que la presión sea tan baja que el camino libre medio de

los átomos sea mucho mayor que la distancia que estos deben recorrer en el interior de la cámara de vacío.

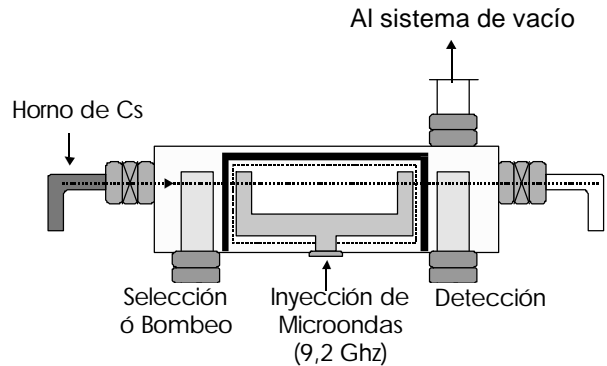


Figura 2. Esquema de los elementos más importantes en un reloj atómico de haz térmico.

3.- Se debe tener un sistema que permita seleccionar uno de los niveles energéticos hiperfinos del estado base de los átomos de Cs. Esto se puede conseguir mediante la aplicación de un campo magnético no uniforme (relojes de selección magnética) con el cual se permite el paso únicamente a los átomos que salen del horno en el nivel de energía adecuado, desechándose los demás átomos. En el caso de relojes de bombeo óptico se hace uso de radiación electromagnética emitida por un láser semiconductor. La ventaja de este último método consiste en que la interacción con el láser puede emplearse para preparar casi el 100% de los átomos en el nivel energético deseado.

4.- Una vez seleccionado uno de los estados hiperfinos del estado base, el paso siguiente es llevar a cabo la interacción de los átomos con microondas (aproximadamente a 9.2 GHz), esto sucede en una cavidad doble construida por primera vez por Norman Ramsey [1], ganador del premio Nobel de Física en 1989. En la región donde se encuentra la cavidad doble, se aplica un campo magnético constante que permite el desdoblamiento, por efecto Zeeman de las 7 transiciones que ocurren entre los niveles Zeeman asociados a los niveles hiperfinos del estado base.

5.- Finalmente se encuentra la región de detección. En los relojes de selección magnética, la detección se lleva a cabo mediante la aplicación de un campo magnético inhomogéneo con el cual se deflecan los átomos que no realizaron la transición hiperfina mientras que aquellos que si lo hicieron son dirigidos hacia un alambre de tungsteno (o algún material con función de trabajo mucho mayor que el potencial de ionización del Cs), aquí ocurre un proceso de ionización por lo que la corriente de átomos se transforma en una corriente eléctrica. En el caso de los relojes de bombeo óptico, la detección se lleva a cabo nuevamente con la ayuda de luz láser. Se hace emitir al láser semiconductor un haz a una frecuencia

tal que al interactuar con los átomos de Cs que llevaron a cabo la transición hiperfina, éstos entran en un proceso de fluorescencia y la luz emitida por los átomos de Cs es registrada por un foto-detector, el cual transforma la señal en una tensión eléctrica. Al variar la frecuencia de las microondas alrededor de los 9.2 GHz, y graficar contra la señal de corriente (o tensión) eléctrica registrada por los detectores, se obtiene el espectro de microondas de los átomos de cesio, ver figura 3. El pico central corresponde a la transición entre los niveles hiperfinos con números cuánticos $F = 3, m_f = 0$ y $F=4, m_f=0$, a los que hace referencia la definición del segundo, esta es conocida como transición de reloj.

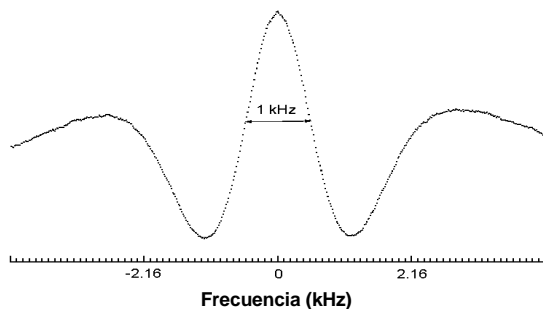


Figura 3. Espectro de microondas de los átomos de Cs-133 en el reloj atómico de bombeo óptico del CENAM. El ancho de línea Df es de 1 kHz.

El reloj atómico funciona como tal cuando el oscilador de cuarzo encargado de generar las microondas que interactúan con los átomos de Cs, se “amarran” a la frecuencia a la que ocurre el máximo en la transición de reloj. En la figura 3 se puede ver de manera obvia que la localización del máximo de la transición de reloj es función directa del ancho Df de la resonancia. Se asume que el reloj atómico funcionará como un patrón primario de frecuencia después de haber hecho las correcciones por efectos sistemáticos debidos a: efecto Zeeman de segundo orden, efecto Doppler de segundo orden, asimetrías de la cavidad de microondas, radiación de cuerpo negro, impureza espectral de las microondas, entre otros, ya que la definición del segundo supone condiciones ideales, donde ninguno de estos efectos se ha tomado en cuenta, pero cada uno de ellos induce un corrimiento en la frecuencia a la que ocurre la resonancia, por lo que es necesario estimar dicho corrimiento y realizar la corrección correspondiente.

N. Ramsey demostró experimentalmente que el ancho de línea Df en el espectro de resonancia del Cs, depende directamente del tiempo Dt que le toma a los átomos atravesar la cavidad de microondas. A menor velocidad, menor ancho de línea, esto significa que si se logra incrementar Dt , ya sea aumentando la longitud de la cavidad de microondas o bien

reduciendo la velocidad de los átomos, se logrará una mejor determinación del pico central que define al segundo, esto es, se incrementará la precisión del reloj atómico.

Actualmente los relojes atómicos de Cs de tipo comercial, emplean el método de selección magnética y pueden reproducir la unidad de tiempo con una incertidumbre de 1 parte en 10^{12} , mientras que los mejores relojes de bombeo óptico con cavidad de microondas de más de un metro de longitud, lo hacen con una incertidumbre de partes en 10^{14} . Las dificultades experimentales aumentan al tratar de construir relojes con cavidades de microondas muy grandes, por lo que la mejor opción ha sido reducir la velocidad de los átomos. Esto, aunado al desarrollo tecnológico en materia de láseres semiconductores ha llevado a la creación de los primeros relojes de fuente atómica.

FUENTE ATÓMICA

La idea de trabajar con átomos lentos con el fin de mejorar la exactitud de un reloj atómico fue propuesta en 1954 por J. Zacharias [2], desafortunadamente sus experimentos no dieron resultado, pero la idea permaneció en la mente de los científicos y en el año de 1991, André Clairon y sus colaboradores [3], de la Escuela Normal Superior de París reportaron el primer trabajo exitoso sobre el desempeño de una fuente atómica de cesio. En la figura 4 se presenta el esquema de una fuente atómica en la que se han omitido por simplicidad detalles del arreglo experimental como son, la cámara de vacío en donde se lleva a cabo la interacción entre los átomos de Cs y los láseres, la óptica necesaria para llevar la radiación láser hasta la región de interacción y el sistema de espectroscopia de saturación necesario para encontrar las transiciones electrónicas para realizar el bombeo óptico, entre otros.

Los seis láseres alineados por pares, perpendiculares entre sí, se encargan de reducir la temperatura de los átomos de cesio. El principio físico que se emplea para lograr esto es el efecto Doppler. Inicialmente, se tienen átomos de cesio moviéndose con una distribución de velocidades tipo Maxwell. Los átomos que cruzan la región donde se intersectan los láseres absorben luz, para ello, los láseres se hacen emitir a una frecuencia ligeramente menor a la de la resonancia, de tal manera, que por efecto Doppler, los átomos que se mueven en dirección a la fuente de luz, encontrarán la frecuencia adecuada para llevar a cabo la transición. Al absorber la radiación, los átomos reciben una cierta cantidad de momento en dirección contraria a la que se están desplazando. Debido a que el proceso de emisión de luz del átomo al caer a un nivel energético inferior ocurre de manera isotrópica, el efecto neto en el átomo es una reducción en su velocidad. El proceso se repite varios miles de veces, en tan solo fracciones de segundo,

por lo que el átomo experimenta una fuerza neta tipo fricción semejante a la que se presenta cuando un objeto se desplaza en un medio viscoso. Por esta razón, al grupo de átomos que experimentan este efecto, se le ha llamado *melaza óptica*, del inglés *Optical molasses*.

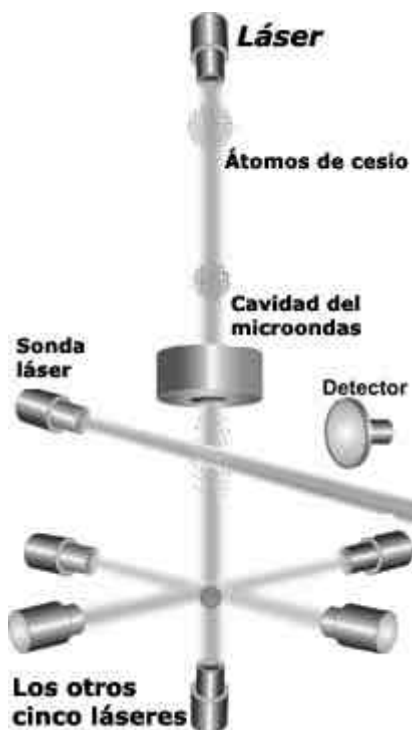


Figura 4. Esquema de una fuente atómica.

El efecto Doppler establece un límite inferior para la velocidad final que puede tener un átomo y esto se debe a que al emitir luz, los átomos sufren un retroceso (por conservación de momento), es decir, adquieren una pequeña velocidad en dirección opuesta a la que es emitido el fotón. Sin embargo, algo que se observó desde los primeros experimentos de enfriamiento de átomos, es que las temperaturas alcanzadas, de algunas decenas de mK por arriba del cero absoluto eran inferiores al límite Doppler. Este efecto se debe a que la luz de los láseres que se emplea para el enfriamiento de átomos se encuentra, linealmente (o circularmente) polarizada y los haces que se propagan en direcciones opuestas tienen estados de polarización perpendicular entre sí. Esto ocasiona que la onda electromagnética estacionaria genere regiones espaciales de dimensiones cercanas a la longitud de onda emitida por el láser, con gradientes de polarización en donde debido a la naturaleza de los átomos (con un momento magnético intrínseco), éstos tienen que transformar parte de su energía cinética en energía potencial, a fin de poder superar las barreras de potencial generadas por las ondas electromagnéticas, esta transformación de energía se traduce en una reducción en la velocidad de los

átomos y consecuentemente en una temperatura menor en la melaza óptica.

Lo que se describió en el párrafo anterior resulta esencial para tener en funcionamiento una fuente atómica, sin embargo, es necesario mencionar que los procesos mencionados únicamente reducen la velocidad de los átomos, pero no los confinan en una región limitada del espacio. A fin de incrementar el número de átomos fríos, es necesario contar con un sistema que evite que los átomos lentos salgan de la región de interacción con los láseres, esto se logra mediante el uso de un arreglo de bobinas anti-Helmholtz, con lo que se genera un gradiente de campo magnético el cual presenta un valor mínimo en el centro del arreglo, la idea es hacer coincidir el mínimo del gradiente de campo magnético con la región de intersección de los seis láseres de enfriamiento. De esta manera los átomos lentos quedan atrapados y la densidad de átomos en la trampa puede llegar a ser del orden de 10^8 átomos/cm³. A este arreglo se le conoce en la literatura como Trampa Magneto-Óptica, o MOT por sus siglas en inglés.

Una vez enfriados y confinados los átomos, sigue una serie de pasos que deben llevarse a cabo en fracciones de segundo. Se debe cancelar (apagar) el campo producido por las bobinas anti-Helmholtz, apagar los 4 láseres en el plano horizontal y a continuación hacer un cambio en la frecuencia relativa entre los láseres en la dirección vertical. El cambio de frecuencia hace que la onda estacionaria se desplace con una cierta velocidad hacia arriba y los átomos atrapados se muevan con la onda a la velocidad de desplazamiento de ésta. Una vez dado el impulso, estos dos láseres también deben apagarse y dejar que los átomos en su movimiento ascendente pasen por la cavidad de microondas, alcancen una altura máxima y en su movimiento descendente (de caída libre), pasen nuevamente por la cavidad de microondas, el efecto final de las microondas sobre los átomos es el mismo al que se tendría en una cavidad doble, la diferencia aquí es que el tiempo que transcurre entre las dos interacciones es del orden de un segundo, esto es, uno o dos órdenes de magnitud mayor a lo que se tiene en los relojes de haz térmico.

Debido a que la velocidad de los átomos, es diferente de cero, estos se estarán dispersando durante todo el recorrido, presentándose el mismo efecto que ocurre con un chorro de agua en una fuente, es por esto que a este arreglo se le ha llamado Fuente Atómica.

Después de cruzar la región de microondas en el descenso, la detección de los átomos que llevaron a cabo la transición de reloj, se hace de la misma manera que en los relojes de bombeo óptico, al maximizar la señal del detector, y amarrar la frecuencia del generador de microondas a la transición hiperfina, se tiene un reloj de fuente atómica.

AVANCES EN LA FUENTE ATÓMICA DEL CENAM

Como se ha descrito en la sección anterior, uno de los elementos más importantes en el funcionamiento de una fuente atómica, es el enfriamiento de átomos. En la División de Tiempo y Frecuencia (DTyF) del CENAM se está desarrollando el sistema experimental en el que se llevará a cabo el enfriamiento de átomos de Cs-133.

Como ingrediente principal se debe contar con la radiación electromagnética de la frecuencia adecuada para la interacción con los átomos. Actualmente, la DTyF ya cuenta con láseres semiconductores de GaAsAl (Arsenuro de Galio dopado con Aluminio) los cuales emiten luz con longitudes de onda de alrededor de 852 nm, la electrónica necesaria para reducir el ancho de banda de emisión, así como el servo-sistema con el que se puede amarrar la frecuencia del láser a la transición deseada. La técnica para la estabilización de los láseres se conoce como espectroscopía de saturación, este es el método que se está empleando actualmente en el reloj de bombeo óptico del CENAM.

En la figura 5 se muestra un esquema del arreglo experimental para enfriar átomos que se encuentra en etapa de construcción en la DTyF.

La cámara de vacío, está hecha de un tubo de vidrio pyrex. Las ventanas por las que entrará la luz láser son de cuarzo. Las razones por las que se decidió utilizar estos materiales son, entre otras, porque tienen un coeficiente de dilatación térmica muy bajo, esto es importante ya que para conseguir presiones del orden de 10^{-10} Torr, es necesario hornear la cámara de vacío a fin de evaporar solventes, vapor de agua o cualquier otro contaminante adherido a las paredes del recipiente. El Cuarzo además tiene la particularidad de presentar un índice de transmisión cercano a 1 para la radiación electromagnética en el infrarrojo cercano (852 nm). Para unir las ventanas de Cuarzo al tubo de pyrex, se empleará un cemento especial para ultra alto vacío. De acuerdo con las especificaciones del fabricante éste tiene una presión de vapor menor a 10^{-12} Torr. En la etapa inicial de bombeo, se empleará una bomba turbomolecular apoyada por una bomba mecánica, posteriormente, cuando la presión sea de 10^{-6} a 10^{-7} , mediante el uso de válvulas electro-neumáticas, únicamente la bomba iónica se encargará de bajar y mantener la presión en el intervalo de 10^{-10} Torr. En la mesa óptica superior se cuenta con espejos que se encargaran de dirigir la luz láser a la región de enfriamiento. En las primeras pruebas se planea utilizar láseres de baja potencia, ya que se sabe que las temperaturas más bajas de la melaza óptica se obtienen con potencias del orden de 10^{-3} W.

La medición de la temperatura, o equivalentemente de velocidad de los átomos, se realizará mediante el uso de la técnica de *tiempo de vuelo*, en la que los

átomos fríos serán liberados de la acción de los láseres en la mesa óptica superior y por la acción de la gravedad, estos caerán. Después de cierto recorrido se aplicará nuevamente luz láser (en la mesa óptica intermedia), de una frecuencia tal que induzca fluorescencia en los átomos. La forma del pulso de luz registrada por el foto-detector dará información directa de la distribución de velocidades de los átomos y a su vez de la temperatura mínima alcanzada por la melaza óptica.

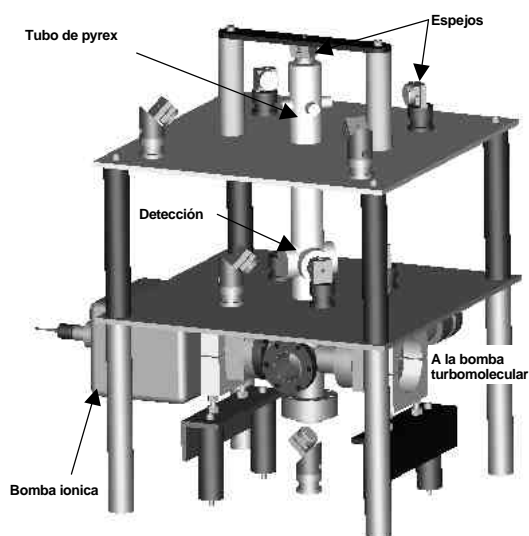


Figura 5. Dibujo a escala del arreglo experimental para enfriar átomos de Cs-133 en la DTyF del CENAM

CONCLUSIÓN

La experiencia de varios años en el manejo y estabilización de láseres semiconductores mediante la técnica de espectroscopía de saturación, así como los avances en la construcción del sistema de enfriamiento de átomos en la DTyF, permiten asegurar que en el transcurso del presente año se estarán realizando los primeros experimentos con átomos fríos y con ello, la meta de contar con un patrón primario de frecuencia basado en una fuente atómica estará aún más cercana.

AGRADECIMIENTOS

E. de Carlos e I. Domínguez agradecen el apoyo de CONACYT a través de becas para estudios de Doctorado y de Repatriación respectivamente.

REFERENCIAS

- [1] N. Ramsey, *Molecular Beams*, Oxford University, Oxford, 1956.
- [2] J. Zacharias, Phys. Rev. **94**, 751, 1954
- [3] A. Clairon, C. Salomon, S. Guellati, and W. D. Phillips, Europhys. Lett. **16**, 195, 1991