

DISEÑO DEL PRIMER RELOJ DE FUENTE ATÓMICA DEL CENAM

Iván Domínguez L.¹, José M. López R.¹, Eduardo de Carlos L.², y Sergio 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: idomingu@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: Se describen los elementos mas importantes del diseño del primer reloj de tipo fuente atómica del CENAM. El sistema de vacío garantizará una presión residual del orden de 10^{-7} Pa. El depósito de Cesio contará con un sistema de control tipo Peltier. La trampa magneto-óptica consistirá de un arreglo de 6 láseres y un campo magnético cuadrupolar. El sistema contará con un par de cavidades resonantes, una para realizar la selección de estados y otra para llevar a cabo la transición hiperfina. Un arreglo de bobinas permitirá generar en la región de interacción un campo magnético homogéneo al nivel de 10^{-9} T. Se espera que la incertidumbre relativa en frecuencia a 1σ sea de partes en 10^{15} , en tanto la estabilidad a cortos periodos de tiempo del orden de $10^{-13}(t)^{-1/2}$.

INTRODUCCIÓN

En un reloj de fuente atómica [1], los átomos de cesio son enfriados a temperaturas del orden de 1 a 2 μ K por arriba del cero absoluto, posteriormente se lanzan en tiro vertical hacia arriba a una región en la que interactúan con microondas las cuales inducen la transición hiperfina en la que esta definida la unidad de tiempo, el *segundo* del sistema internacional de unidades (SI). La nube de átomos sometida a la acción de la fuerza gravitacional alcanza su altura máxima y en su movimiento descendente cruza nuevamente la región de interacción con microondas, después de esta interacción doble tipo Ramsey [2] los átomos completan la transición hiperfina y a continuación se registra el número de átomos que efectuaron dicha transición. Entre lanzamientos sucesivos se hace un ajuste a la frecuencia de las microondas de tal manera que el número de átomos que efectúan la transición hiperfina sea máximo, al mantener la frecuencia de las microondas en ese valor optimo se esta reproduciendo la unidad de tiempo de acuerdo a su definición y por lo tanto se dice que se tiene un reloj de fuente atómica.

En la práctica, construir un reloj de fuente atómica es mucho mas complicado de lo que el párrafo anterior puede hacer suponer, baste mencionar que a los laboratorios nacionales de metrología de mayor prestigio en el mundo como son el Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences (LPTF), el National Institute of Standards and

Technology (NIST) y el Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), les ha tomado alrededor de 5 años poner en funcionamiento este tipo de patrones, en tanto, otros laboratorios nacionales aun siguen trabajando en la construcción de patrones similares.

En el caso particular de la fuente atómica del CENAM, la idea es aprovechar la experiencia adquirida por los laboratorios pioneros en este campo y desarrollar un diseño en el que se consideren las partes que mejor han funcionado en las fuentes atómicas construidas por esos laboratorios. A continuación se describen los elementos mas importantes que formarán la futura fuente atómica del CENAM la cual se muestra en la figura 1. Aún se encuentra en revisión el diseño para la región de vuelo en la que los átomos serán excitados para llevar a cabo la transición hiperfina, sin embargo aquí se describe la opción que significa una reducción considerable en costo.

DEPOSITO DE CESIO

A diferencia de los relojes atómicos de haz térmico [3], en una fuente atómica no es necesario calentar el cesio a temperaturas por arriba de la temperatura ambiente, únicamente se requiere controlar la temperatura del depósito de cesio en el intervalo de 15 a 20 °C, esta temperatura es suficiente para tener una presión de vapor de cesio del orden de 10^{-5} Pa. El control de temperatura del depósito se logra por medio de dispositivos Peltier conectados de tal forma que la región de alta temperatura (30 a

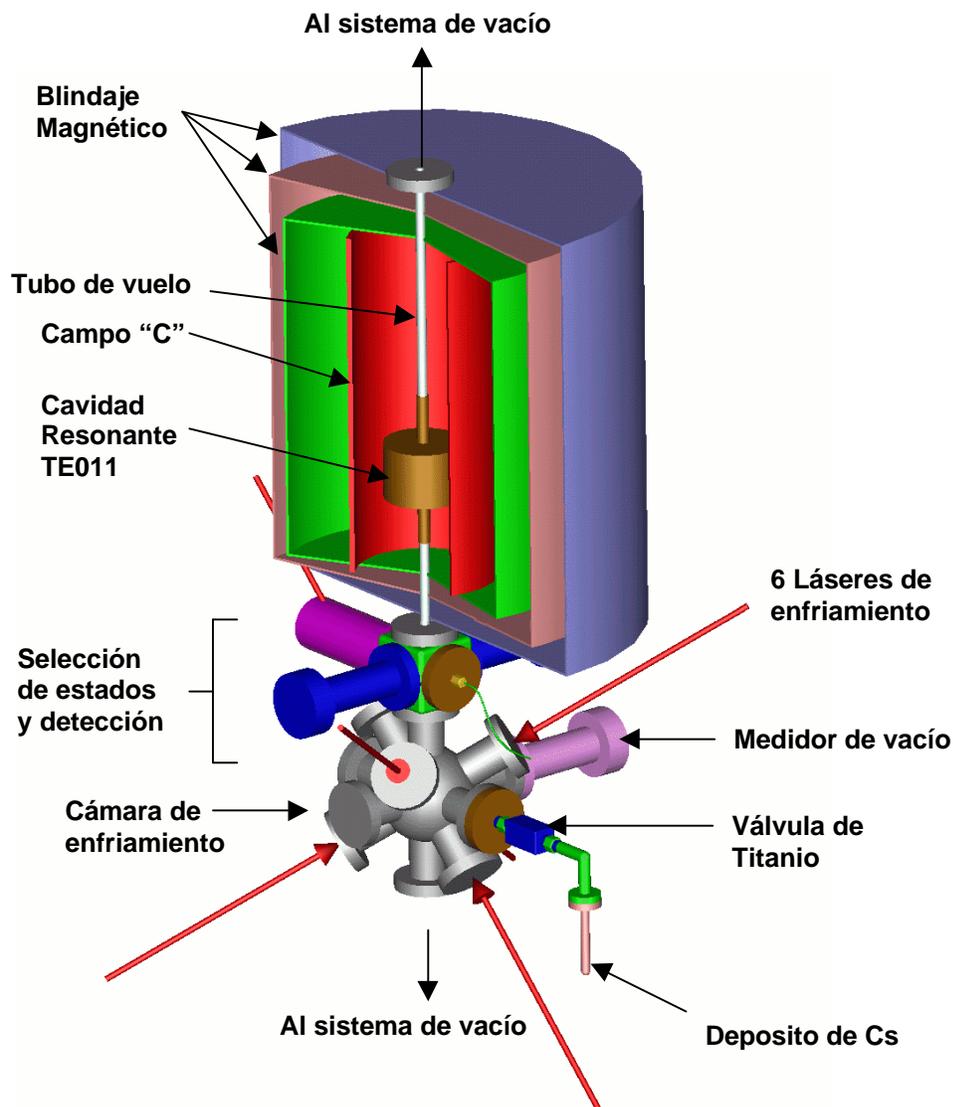


Fig. 1 Esquema de la fuente atómica del CENAM

35 °C) mantiene a la válvula caliente respecto al resto del depósito, evitando así la condensación de vapor de cesio. El depósito se une a la cámara de enfriamiento por medio de una válvula hecha de Titanio, la permeabilidad magnética de este material, cercana a la del vacío, evita perturbaciones a los campos magnéticos generados por las bobinas anti-Helmholtz.

CÁMARA DE ENFRIAMIENTO

La cámara de vacío en la que se llevará a cabo el confinamiento y enfriamiento de los átomos de Cs estará construida en acero inoxidable tipo 304, contará con 12 puertos, 6 de los cuales se

emplearán para admitir los haces de luz láser, un puerto en el extremo inferior se usará para conectar el sistema de vacío y otro en el extremo superior servirá para unir la cámara al resto de la fuente atómica. Una geometría de 12 puertos en esta región dará la flexibilidad de explorar diferentes arreglos en los rayos láser a fin de optimizar el enfriamiento. Las ventanas de cuarzo recubierto con superficie anti-reflejante estarán unidas en cada puerto por medio de sellos para vacío tipo Helicoflex modelo delta.

Inicialmente se empleará un arreglo MOT estándar y posteriormente se estudiará el enfriamiento en fase de melaza óptica, esto es, en ausencia de campos

magnéticos. Dos de las ventajas del enfriamiento en fase de melaza con respecto a una MOT estándar son: a) las temperaturas de enfriamiento son más bajas y, b) al no usar las bobinas anti-Helmholtz se evita el gradiente de temperatura que estas ocasionan en la región del tubo de vuelo, con lo que se reduce uno de los efectos sistemáticos más importantes que corren la frecuencia en un reloj atómico [4].

SISTEMA DE VACÍO

Es importante que los átomos de cesio no interactúen con ningún tipo de partícula después de que estos son lanzados hacia la región de interacción con microondas y hasta que estos efectúan la transición hiperfina y son detectados, para ello se requiere contar con un sistema de vacío que permita tener una presión residual del orden de 10^{-7} Pa y que al admitir vapor de Cs en el interior de la cámara mantenga la presión en el orden de magnitud de 10^{-6} Pa, esto se logra con un par de bombas iónicas con capacidad de bombeo de 20 l/s.

REGIÓN SELECTORA DE ESTADOS

Durante el proceso de enfriamiento los átomos ocupan los niveles $|S_{1/2}, F=4, m\rangle$, donde m puede tomar valores enteros entre -4 y 4 . La reproducción del segundo SI esta basada en la transición entre los niveles hiperfinos del estado base, sin embargo, bajo la perturbación de un campo magnético externo, la transición entre los estados $|S_{1/2}, F=3, m=0\rangle$ y $|S_{1/2}, F=4, m=0\rangle$ presenta un corrimiento menor. Por lo tanto, de la nube de átomos fríos solamente resultan de interés aquellos que realizan la transición hiperfina con $m=0$, por lo que resulta conveniente eliminar a todos aquellos átomos que no cumplen con esta condición, de no hacerlo, estos contribuirán de manera importante en otro efecto sistemático ocasionado por las colisiones entre átomos de Cs [5]. La cavidad selectora de estados permite inducir la transición hiperfina deseada de tal manera que después de la interacción los átomos que se encontraban en el estado $|S_{1/2}, F=4, m=0\rangle$ ahora ocuparán el estado $|S_{1/2}, F=3, m=0\rangle$ [6]. Ajustando la frecuencia de uno de los láseres es posible aplicar presión de radiación sobre aquellos átomos que permanecieron en el nivel $|S_{1/2}, F=4, m\rangle$ y alejarlos de la trayectoria vertical ascendente. Con esto que se eliminan de la nube a los átomos con $m \neq 0$, continuando en movimiento ascendente únicamente aquellos átomos en el estado $|S_{1/2}, F=3, m=0\rangle$.

CAVIDAD RESONANTE DE MICROONDAS

La cavidad resonante en la que se llevará a cabo la transición hiperfina se muestra en la figura 2. Al igual que en otras fuentes atómicas, esta tendrá simetría cilíndrica, por lo que el campo magnético oscilará en el modo TE₀₁₁, este modo presenta un alto factor de calidad intrínseco lo que implica una pequeña variación de la fase con la posición radial en la cavidad. La geometría de la cavidad de microondas se describe en las Referencias [7, 8].

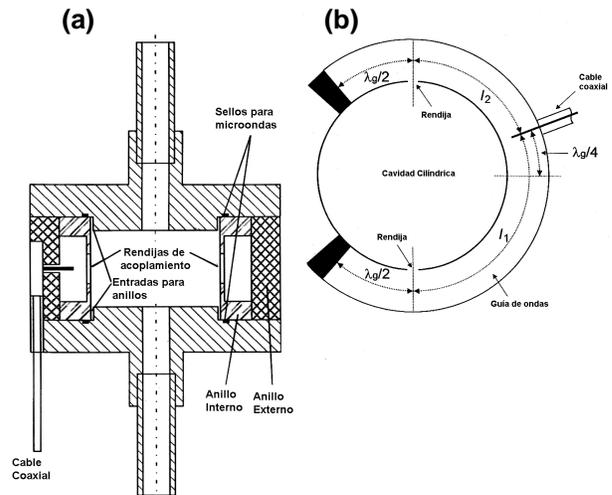


Fig. 2 Esquema de la cavidad resonante de microondas. La descripción se da en el texto.

La figura 2 muestra un corte transversal de: (a) vista lateral y (b) vista superior de la cavidad de microondas y de la estructura del acoplamiento de la guía de ondas. La línea coaxial que lleva la señal de microondas esta acoplada con una guía de ondas que se divide en dos ramas curvas, la conexión de alimentación esta corrida por $\lambda_{g/4}$ (λ_g es la longitud de la onda guiada) del plano de simetría a fin de excitar el campo de la cavidad cilíndrica con igual fase en las 2 rendijas.

TUBO DE VUELO

Actualmente se están considerando dos diferentes configuraciones. La primera, mostrada en la figura 1 implica un bajo costo y simplicidad en el diseño, se trata de construir el tubo de vuelo a partir de un tubo de cuarzo de 1 cm de diámetro el cual se inserta en la cavidad resonante de microondas. Este diseño permite que las conexiones y el aislante para microondas se encuentren a presión atmosférica lo cual elimina por completo las complicaciones de

tener los conductores de microondas dentro del sistema de vacío. El tubo de cuarzo reduce considerablemente el volumen de la región de vuelo en el sistema de vacío. La desventaja principal de este diseño consiste en el corrimiento en la frecuencia de resonancia por efecto de la pared de cuarzo que debe ser atravesada por las microondas para interactuar con los átomos de cesio, sin embargo este efecto puede ser corregido modificando ligeramente las dimensiones de la cavidad resonante [9].

La segunda posibilidad consiste en construir el tubo de vuelo en Titanio, dentro de este tubo se alojaría la cavidad resonante de microondas, este es un método con mayores complicaciones debido a las conexiones de los conductores de microondas en el sistema de vacío y el aumento de más de un orden de magnitud en el volumen de la cámara de vacío, el incremento en costo también resulta considerable, sin embargo se sabe que este diseño ha dado buenos resultados en otros laboratorios [5, 6].

CAMPO “C”

El campo “C” será generado con una bobina de alambre de cobre enrollado en un cilindro de aluminio, el diámetro de este será tal que en su interior estará contenida la cavidad de microondas. Debido a la uniformidad requerida en el campo magnético generado por esta bobina se requiere de características especiales en el maquinado del tubo a fin de minimizar cualquier deformación mecánica ocasionada por cambios de temperatura.

BLINDAJE MAGNÉTICO

Con el fin de garantizar la homogeneidad del campo “C” al nivel de partes en 10^9 Teslas se dispondrá de un arreglo de tres capas de blindaje magnético construido en Co-Netic AA de 2.5 mm de espesor. Asimismo se contará con bobinas correctoras a lo largo de la trayectoria de los átomos a fin de reducir los gradientes de campo magnético responsables de transiciones Majorana, las cuales también introducen errores sistemáticos en los relojes atómicos de haz térmico [10].

REGION DE DETECCIÓN

La detección se llevará a cabo empleando un arreglo similar al que se describe en la Ref. [6], el cual se muestra esquemáticamente en la figura 3.

Los átomos después de realizar la doble interacción con las microondas cruzan una onda estacionaria transversal ajustada a la transición $F = 4 \rightarrow F' = 5$, cada átomo en el estado $F = 4$ emite alrededor de 10^4 fotones. Una fracción de esta fluorescencia se registra con un foto detector. La señal es integrada en el tiempo resultando un N_4 proporcional al número de átomos en el estado $F = 4$. Enseguida los átomos en el estado $F = 4$ son desviados de su trayectoria por una onda viajera transversal ajustada a la transición $F = 4 \rightarrow F' = 5$. Los átomos en el estado $F = 3$ se detectan un poco mas abajo utilizando una segunda onda estacionaria, la cual consiste de una superposición de dos ondas ajustadas a las transiciones $F = 3 \rightarrow F' = 4$ y $F = 4 \rightarrow F' = 5$. Durante la interacción de los átomos con esta superposición de campos electromagnéticos, primero son bombeados al estado $F = 4$, y luego registrados por un segundo foto detector que proporciona una medida del número N_3 , de átomos en el estado $F = 3$. La fracción $N_{34} = N_3/(N_3+N_4)$, indica la fracción de átomos excitados por las microondas.

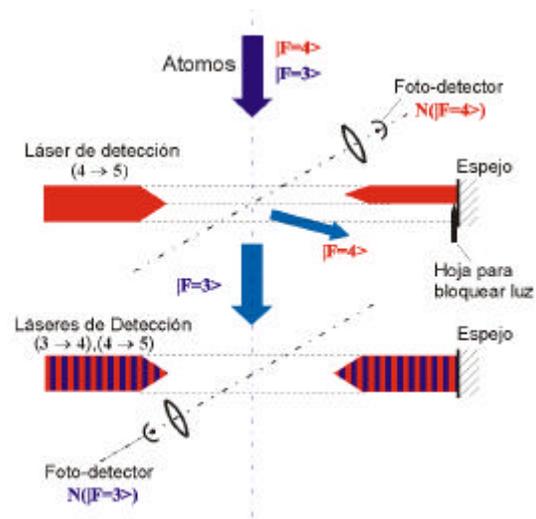


Fig. 3 Esquema del sistema de detección

ARREGLO ÓPTICO

El sistema de láseres semiconductores utilizados para enfriar y detectar a los átomos esta basado en 2 diodos láser de cavidad extendida (ECDL). La estabilización de los láseres se lleva a cabo utilizando una técnica de absorción saturada en una ampolla de cesio a temperatura ambiente en la que se buscan las señales $F = 4 \rightarrow F' = 5$ y $F = 3 \rightarrow F' = 4$.

En la figura 4 se presenta un esquema simplificado del arreglo óptico que se utilizará. El láser estabilizado a la transición $F = 4 \rightarrow F' = 5$ se usa como oscilador maestro para la inyección y amarre de un diodo láser (esclavo) de 200 mW de potencia, el cual proporciona los 6 láseres de enfriamiento, tres de los cuales se sitúan por arriba del centro de la cámara de enfriamiento (MOT vert. I) y otros tres en la parte inferior de la misma (MOT vert. II). La mayor parte de la luz del láser maestro se emplea para la detección de los átomos. La luz del otro ECDL re-bombea a los átomos del estado base $F = 3$ en las zonas de enfriamiento y de detección. Los corrimientos de frecuencia de la luz láser se realizan usando moduladores acusto-ópticos (AOM) controlados por computadora.

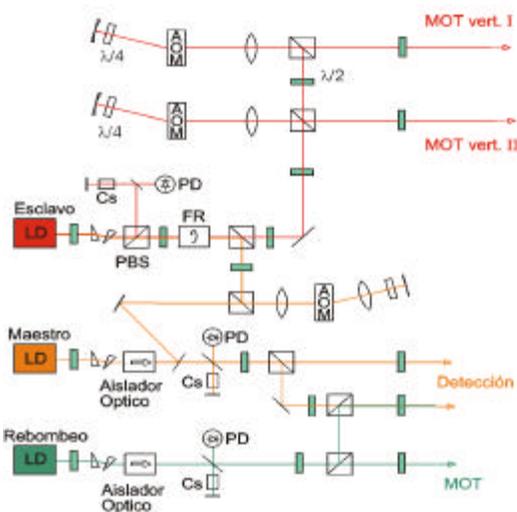


Fig. 4 Arreglo óptico que se empleará para el enfriamiento de átomos de cesio en la fuente atómica del CENAM.

DISCUSIÓN

El propósito del presente trabajo no es entrar en los detalles de la evaluación de errores sistemáticos en un reloj de fuente atómica, lo cual sería materia para otra publicación, sin embargo resulta necesario al menos mencionar cuales son los efectos que determinan o limitan la estabilidad y exactitud en un patrón de este tipo. En el caso de la fuente atómica del CENAM, su diseño trata de integrar las mejores características de funcionalidad de las fuentes atómicas que ya se encuentran en operación en el mundo, así como de algunas innovaciones planteadas recientemente por otros laboratorios nacionales de metrología. Es importante mencionar que la mayoría de las fuentes atómicas operadas en

laboratorios nacionales de metrología presentan incertidumbres relativas de frecuencia 1σ de partes en 10^{15} , en tanto las estabilidades a cortos periodos de tiempo son del orden de $10^{-13}(t)^{-1/2}$, esta se encuentra limitada principalmente por el oscilador de cuarzo encargado de generar las microondas que inducen la transición hiperfina en los átomos de ^{133}Cs . El diseño de la fuente atómica del CENAM contará con un sintetizador de microondas similar al que se emplea en la fuente atómica del NIST, el cual fue construido en 1996 con la colaboración de personal de la División de Tiempo y Frecuencia del CENAM [11]. La estabilidad de la fuente atómica también esta determinada por la razón de señal a ruido proveniente de los foto detectores. En el CENAM se empleará el mismo tipo de foto detector de estado sólido que se usa en el PTB y LPTF y la señal será generada a partir del enfriamiento de 10^6 a 10^8 átomos de cesio lo cual se logra usando láseres semiconductores de 200 mW de potencia y una presión de vapor de cesio del orden de 10^{-5} Pa, de manera análoga al esquema empleado por el PTB.

La frecuencia generada por una fuente atómica presenta corrimientos ocasionados principalmente por el campo magnético "C", las colisiones entre átomos de Cs, así como por los gradientes de temperatura en el tubo de vuelo.

La incertidumbre en frecuencia asociada al efecto del campo magnético al interior del tubo de vuelo (campo "C"), se reduce considerablemente al construir un blindaje magnético que mantenga la uniformidad del campo hasta el orden de partes en 10^9 T, con ello se reduce la incertidumbre relativa en frecuencia ocasionada por este efecto a partes en 10^{16} [6]. El blindaje magnético de la fuente atómica del CENAM será similar en forma y material al que emplea la fuente atómica del PTB.

El corrimiento de la frecuencia ocasionado por colisiones entre átomos moviéndose en la nube depende de manera proporcional de la densidad de átomos [12]. Típicamente la incertidumbre relativa en frecuencia es del orden de 10^{15} para una densidad en el intervalo de 10^6 a 10^8 átomos/cm³. En la fuente atómica del CENAM se trabajará con densidades atómicas de este orden de magnitud y estas se determinarán experimentalmente usando un arreglo óptico similar al que se emplea en el NIST, PTB y LPTF, aunado a esto, el sistema de vacío que se propone en el diseño del CENAM garantizará una presión base del orden de 10^{-7} Pa, por lo que las colisiones con las partículas del gas

residual serán despreciables ya que el camino libre medio de los átomos de cesio bajo esas condiciones excederá las dimensiones de la fuente atómica al menos por un factor de 100.

El control de temperatura en el laboratorio del CENAM, con variaciones diarias cercanas a 1°C, así como el uso de tres termopares colocados a lo largo del tubo de vuelo permitirán reducir la incertidumbre relativa en frecuencia ocasionada por gradientes de temperatura a pocas partes en 10^{16} [6].

Siendo los factores mencionados en los párrafos anteriores los más relevantes en la incertidumbre de la frecuencia en una fuente atómica y tomando como modelo en estos aspectos los diseños del PTB, NIST y LPTF para la construcción de la fuente del CENAM, se espera conseguir resultados similares en estabilidad y frecuencia a los obtenidos por estos laboratorios.

Algunos aspectos que simplificarán y reducirán el costo de la fuente atómica del CENAM fueron tomados de la propuesta del Center for Measurement Standards ITRI, de Taiwán, para la región del tubo de vuelo [9]. La geometría de los haces de luz láser para llevar a cabo el enfriamiento en la MOT fue tomado del National Physical Laboratory del Reino Unido en un diseño propuesto para la segunda fuente atómica de ese laboratorio [13], y finalmente la forma compacta del arreglo esta basada en la fuente atómica construida recientemente por el US Naval Observatory [14].

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado el diseño preliminar para el reloj de fuente atómica que será construido en el Centro Nacional de Metrología. Las partes que lo componen se han tomado recopilando las mejores características de otras fuentes atómicas ya construidas, o en proceso de construcción en diversos laboratorios nacionales de metrología.

El nivel de exactitud y estabilidad esperado en la fuente atómica del CENAM es del mismo orden de magnitud que el obtenido en las fuentes atómicas que actualmente se encuentran en operación alrededor del mundo ya que las características más relevantes que determinarán la estabilidad y exactitud de la fuente del CENAM serán similares a las de las fuentes atómicas del NIST, PTB y LPTF.

REFERENCIAS

- [1] P. Weiss. Tossing cold atoms like confetti, atomic-fountain clocks launch a new era in timekeeping, *Science News* **156**, (1999), 92-94.
- [2] N. Ramsey, "History of atomic clocks", *Journal of Research of National Institute of Standards and Technology*, **88**, (1983), 301-315.
- [3] C. Audoin, *Caesium Beam Frequency Standards: Classical and Optically Pumped*, *Metrologia*, **29**, (1992), 113-120
- [4] E. Simon, Ph. Laurent, and A. Clairon. Measurement of the Stark shift of Cs hyperfine splitting in an atomic fountain, *Phys. Rev. A* **57**, No. 1, (1998), 436-439.
- [5] S. Ghezali, Ph. Laurent, S. N. Lea and A. Clairon. An experimental study of spin exchange frequency shift in a laser-cooled Cs fountain frequency standard, *Europhys. Lett.* **36**, No. 1, (1996), 25-30.
- [6] S. Weyers, U. Hübner, R. Schröder, Chr. Tamm, and A. Bauch. Uncertainty evaluation of the atomic caesium fountain CSF1 of the PTB. *Metrologia* **38**, No. 4, (2001), 343-352.
- [7] S. Weyers, U. Hübner, R. Schröder, Chr. Tamm, and A. Bauch. Proc. 14th Europ. Freq. Time Forum (EFTF), (2000), 632-633.
- [8] R. Schröder, U. Hübner and D. Griebisch. Design and realisation of the microwave cavity in the PTB caesium atomic fountain clock. (2001), submitted to *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr.*
- [9] M. Sheng, A. Yao, J. Long, Ch. Chuan. Compact cesium atomic fountain clock. Proc. EFTF-IEEE IFCS, (1999), 27-29.
- [10] A. Bauch and R. Schröder. Frequency shifts in a cesium atomic clock due to Majorana transitions, *Annalen der Physik* **2**, (1993), 421-449.
- [11] J. F. Nava, F. L. Walls, J. H. Shirley, W. D. Lee and M. C. Aramburo. Environmental effects in frequency synthesizers for passive frequency standards, Proc. 1996 IEEE Int. Freq. Control Symp., (1996), 973-979.
- [12] G. Santarelli, Ph. Laurent, P. Lemonde, A. Clairon, A. G. Mann, S. Chang, N. Luiten, and C. Salomon. Quantum projection noise in an atomic fountain: A high stability cesium frequency standard, *Phys. Rev. Letters* **82**, No. 23, (1999), 4619-4622.
- [13] M. Sheng, A. Yao, J. Long, Ch. Chuan. Development of a caesium fountain primary frequency standard at the NPL. Proc. EFTF-IEEE IFCS, (1999), 24-26.
- [14] T. B. Swanson, E. A. Burt, and Ch. R. Ekstrom. Preliminary results from the USNO cesium fountain. Proc. 2000 IEEE/EIA, IFCS, (2000), 672-675.