

HACIA UNA NUEVA DEFINICIÓN DE LA UNIDAD DE TIEMPO DEL SI

J. M. López², E. de Carlos¹, C. A. Ortiz^{1,2} and R. Gutierrez^{1,2}

¹ Dirección de Metrología de Tiempo y Frecuencia, Centro Nacional de Metrología, CENAM, km 4.5 carretera a los Cués, El Marqués, 76246, Querétaro, México.

² Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (IPN), CINVESTAV, Unidad Querétaro, Libramiento Norponiente No 2000, Fracc. Real de Juriquilla, Querétaro, Querétaro 76230, México.

+524422119931, jm.lopez@cinvestav.mx

Resumen: La incertidumbre fraccional alcanzada en los últimos 10 años por los patrones de frecuencia que operan en la región óptica ha llevado a la comunidad internacional a considerar una eventual redefinición de la unidad de tiempo en el SI, el segundo. Dicha unidad está definida desde 1967 en términos de una frecuencia en la región de las microondas. Una nueva definición implica la operación sistemática de un número suficiente de relojes ópticos, su comparación a través de enlaces de fibra óptica y el desarrollo de escalas de tiempo utilizando estas nuevas tecnologías. Los beneficios son indiscutibles y pueden ser aprovechados en un amplio rango de aplicaciones científicas y tecnológicas de frontera.

1. INTRODUCCIÓN

La unidad de tiempo del Sistema Internacional (SI) de unidades, el segundo, se define desde 1967 como *la duración de 9192631770 periodos de la radiación asociada a la transición hiperfina del estado base del átomo de Cesio-133*. La incertidumbre fraccional correspondiente a la realización de la unidad de tiempo del SI, hecha a través de relojes primarios de Cesio, mejora a razón de un orden de magnitud por década. Actualmente la mejor realización del segundo del SI obtenida con gas ultra frío de ¹³³Cs en las llamadas fuentes atómicas tiene una incertidumbre de 1.1×10^{-16} [1]. Por otro lado, los patrones de frecuencia óptica han evolucionado con mayor rapidez, a saber, a razón de 2 órdenes de magnitud por década. Actualmente la estimación de incertidumbre en relojes atómicos ópticos de ⁸⁷Sr es de 2.1×10^{-18} [2]. En la figura 1 se puede observar la evolución en el tiempo de la incertidumbre fraccional de la realización del segundo con relojes de ¹³³Cs y con estándares de frecuencias ópticas.

a través del cuestionamiento de la validez de los modelos fundamentales de la naturaleza [3], la medición de la constancia de las constantes fundamentales [4], entre otras motivaciones. Actualmente despuntan también necesidades asociadas al desarrollo de nueva tecnología como la geodesia relativista [5, 6] y comunicaciones ultra rápidas.

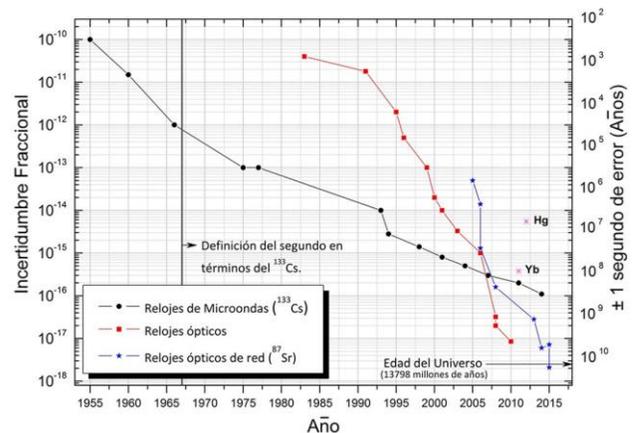


Fig. 1. Evolución en el tiempo (años) de la incertidumbre fraccional de la realización del segundo con relojes de ¹³³Cs y con estándares de frecuencias ópticas.

2. DISCUSIÓN

Si bien las necesidades industriales están por el momento satisfechas con la actual definición de la unidad de tiempo, aparecen ya en el horizonte diferentes aplicaciones que demandan reformular la definición del segundo. Entre estas se puede mencionar las de investigación básica, por ejemplo aquellas requeridas en la búsqueda de nueva física

A esta lista hay que agregar la Metrología primaria que tiene la necesidad intrínseca de sustentar la definición de las unidades base precisamente en la frontera de la ciencia y la tecnología. Actualmente

alrededor de una docena de mediciones de diferentes transiciones ópticas han sido reportadas y adoptadas por el CIPM como representaciones secundarias de la unidad de tiempo [7]. Las incertidumbres en dichas mediciones van de 2.1×10^{-18} hasta 4.2×10^{-15} . La tabla 1 muestra tales transiciones y las incertidumbres reportadas para cada una de ellas. Entre los beneficios de una nueva definición de la unidad de tiempo se encuentra la generación de escalas de tiempo, particularmente la escala UTC, cuya estabilidad se verá mejorada por la participación de un número creciente de patrones primarios de frecuencia ópticos de mayor estabilidad y mejor exactitud. Sin embargo, la adopción de una nueva definición para el segundo del SI debe darse bajo ciertas condiciones mínimas en cuanto al desarrollo, madurez y número de relojes atómicos ópticos operados en los Institutos Nacionales de Metrología (NMIs). Entre las condiciones mínimas deseables se pueden mencionar las siguientes:

- i) Por lo menos tres diferentes NMIs deben desarrollar y operar de manera regular patrones primarios de frecuencia ópticos con una incertidumbre no mayor a 5×10^{-18} .
- ii) Cada uno de los relojes mencionados en el inciso anterior debe haber participado en la comparación con lo menos otro reloj similar resultando en una diferencia fraccional de frecuencia no mayor a 5×10^{-18} .
- iii) Cada uno de los relojes atómicos mencionados en el inciso i) debe haber participado en una comparación con un patrón primario de frecuencia de ^{133}Cs cuyo resultado debe estar limitado por la incertidumbre del reloj de Cesio.

3. CONCLUSIONES

De acuerdo con lo mencionado en este trabajo, hay ventajas significativas en un amplio rango de aplicaciones como consecuencia de adoptar una nueva definición del segundo en el SI. En particular en la exactitud y estabilidad de la escala de tiempo UTC. Sin embargo, se deben cumplir varias condiciones para que dicha redefinición resulte viable. Específicamente se debe avanzar en el desarrollo y maduración de técnicas de comparación entre relojes ópticos utilizando fibras ópticas y en el desarrollo de nuevos patrones de frecuencia ópticos en distintos lugares alrededor del mundo.

Tabla 1. Transiciones atómicas usadas en patrones de frecuencia ópticos.

Átomo / Ion	Tipo De Reloj	ν (THz)	λ (nm)	Incertidumbre ($\times 10^{-18}$)
^{87}Sr	Red	429	698	2.1
$^{171}\text{Yb}^+$	Ion octupolar	642	467	3.2
$^{27}\text{Al}^+$	Ion, Lógica cuántica	1121	267	8.6
$^{88}\text{Sr}^+$	Ion cuadrupolar	445	674	12
$^{199}\text{Hg}^+$	Ion cuadrupolar	1065	282	19
$^{40}\text{Ca}^+$	Ion cuadrupolar	411	729	34
^{199}Hg	Red	1129	266	72
$^{171}\text{Yb}^+$	Ion cuadrupolar	688	436	110
^{171}Yb	Red	518	578	340
^1H	Haz criogénico	1233	243	4200

AGRADECIMIENTOS

C. A. Ortiz thanks CONACYT for his Ph. D scholarship and Cinvestav / CENAM for scientific and technical support.

R. Gutierrez thanks CONACYT for his Ms.C. scholarship and Cinvestav / CENAM for scientific and technical support.

REFERENCIAS

- [1] Thomas P Heavner *et al.*, "First accuracy evaluation of NIST-F2", *Metrologia*, vol. 51, pp. 174-182, 2014.
- [2] Hidetoshi Katori *et al.*, "Cryogenic optical lattice clocks", *Nature Photonics*, vol. 9, pp. 185-189, 2015.
- [3] Margolis H., "Timekeepers of the future", *Nat. Phys.*, vol. 10, pp. 82-83, 2014.
- [4] Jean-Philippe Uzan, "Varying Constants, Gravitation and Cosmology", *Living Rev. Relativity*, vol. 14, 2011.
- [5] Enrico Mai, "Time, Atomic Clocks, and Relativistic Geodesy", *Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften*, 2013.
- [6] A. Bjerhammar, "On a relativistic geodesy", *Bull. Géod.*, vol. 59, pp. 207-220, 1985.
- [7] <http://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/standard-frequencies.html>.