

MEDIDA PRECISA DEL TIEMPO

Ruben A. Vargas
Departamento de Física.
Universidad del Valle.

Resumen

En el año 1989, Norman F. Ramsey y Daniel Kleppner compartieron el premio Nobel de Física por hacer avanzar el campo de las medidas de alta precisión. En el presente artículo se difunde el desarrollo que ha tenido la medida de tiempo y frecuencia, mostrando su ascenso desde los demarcadores primitivos de la inclinación del sol hasta los actuales relojes atómicos.

Introducción

La observación que el hombre ha hecho de los eventos que se suceden periódicamente en su ambiente físico y en su naturaleza biológica, claramente debió haber condicionado su desarrollo del concepto de tiempo. La tierra ha estado sujeta a fenómenos con marcadas periodicidades, tales como el paso del día a la noche y los cambios en las estaciones. Estos fenómenos tuvieron un profundo efecto en la evolución de organismos biológicos, como el ritmo circadiano de la mayor parte de los animales que los conduce a la necesidad de dormir a intervalos de aproximadamente un día, inclusive si están confinados a un ambiente artificial sin cambios periódicos en la iluminación. A su vez, este desarrollo ha estado condicionado por la habilidad del hombre para medir el tiempo, y en algunos aspectos el mismo significado de tiempo esta relacionado con los métodos empleados para medirlo.

En cualquier dispositivo para medir el tiempo distinguimos tres elementos básicos: 1) un mecanismo que suministra un evento periódico, tal como el movimiento de un péndulo; 2) una fuente de energía para mantener el movimiento sin afectar apreciablemente la periodicidad; y 3) un mecanismo para contar los períodos y mostrar el tiempo transcurrido.

En la medición del tiempo, es necesario caracterizar propiedades en los relojes como exactitud, reproducción y estabilidad. La exactitud mide el grado de concordancia de un reloj con el valor especificado en la definición de la unidad de tiempo. La reproducción tiene que ver con el grado de concordancia de varios relojes independiente que tienen el mismo diseño y que fueron inicialmente sincronizados. La estabilidad es una medida del grado con el que un dispositivo presenta el mismo resultado en intervalos iguales de tiempo. Debido a que la estabilidad y la exactitud de un reloj son determinados esencialmente por el mecanismo que suministra la periodicidad, prestaremos especial atención en el resto de este trabajo a este elemento.

Las fuentes de periodicidad para medir el tiempo han sido muy diversas, y ya desde la antigüedad muchas civilizaciones primitivas levantaron monumentos que estaban orientados para detectar el solsticio de verano; indicadores de la inclinación del sol fueron usados para dividir el día en unidades medibles y posteriormente, con los avances de esas civilizaciones, fueron superados por relojes de agua, velas encendidas y vasos con arena. La precisión de estos primeros relojes no podría ser mayor a 1000 segundos por día, y puesto que hay aproximadamente 100.000 segundos en un día, se sigue que la exactitud de esos relojes era de una parte en 100 o de 10^{-2} .

Cuenta la tradición que en 1583, Galileo comparó el movimiento de una lámpara oscilante con su pulso y descubrió que el período de la lámpara era aproximadamente independiente de su amplitud [1]. Esta observación suministró la base científica para el uso de los péndulos en los relojes. Pero, solo después de 73 años logró el científico y relojero danés Christian Huygens desarrollar un mecanismo apropiado, llamado escapamento, que mantuviera las oscilaciones y construir de esta forma con éxito el primer reloj controlado por péndulo. Debido a que la transferencia de tecnología era lenta en ese tiempo, solo veinte años más tarde Huygens combinó algunas ideas de Robert Hooke (científico inglés) sobre resortes con su propio mecanismo escapamento, para producir un nuevo reloj cuya periodicidad fué suministrada por una rueda balanceada que oscilaba al estar sujeta por un resorte. Este reloj fué el pionero de los relojes de rueda balanceada

y resortes de cabello. Por otra parte, el reloj de péndulo continuó suministrando el más preciso trazado del tiempo por los siguientes dos siglos y medio. La exactitud de ambos relojes, tanto el de péndulo como de rueda balanceada, mejoró progresivamente hasta el siglo veinte a medida que se iban introduciendo compensaciones para disminuir el efecto de los cambios de las condiciones externas como temperatura. A mediados del siglo veinte, la estabilidad del mejor de los relojes de péndulo fue aproximadamente 2×10^{-8} [1].

Los primeros relojes fueron desarrollados principalmente para medir el paso del tiempo. Sin embargo, la motivación central para desarrollar dispositivos de afinamiento de tonos, osciladores de cristales de cuarzo y de relojes atómicos, fué la medida de frecuencia, o sea el número de ciclos de oscilación por segundo (herzio). Si se asegura que el conteo de los ciclos es correcto, una medida precisa de tiempo asegura una medida igualmente precisa de frecuencia, e inversamente, un dispositivo que oscile a una frecuencia estable puede ser la fuente de periodicidad para un reloj.

Relojes de cristales piezoelectricos

Un sólido que vibre puede suministrar la frecuencia o periodicidad para un reloj. Sin embargo, es difícil mantener los movimientos vibratorios en la mayor parte de las sustancias; pero, ciertos cristales tienen la propiedad de piezoelectricidad (literalmente, presión-electricidad) que permite mantener esos movimientos. Piezoelectricidad es polarización (corrimiento en las posiciones relativas de las cargas positivas y negativas producidas por esfuerzo mecánico en ciertos cristales), y es también el efecto inverso, o sea producción de esfuerzo mecánico en el cristal cuando se polariza eléctricamente. La piezoelectricidad permite a un cristal acoplarse a un circuito electrónico para mantener las vibraciones y contarlas. Aunque el fenómeno fué descubierto por Pierre y Jacques Curie en 1880, y los cristales piezoeléctricos fueron subsecuentemente usados por Nicholson y Cady en un oscilador electrónico, fue solo en 1928 cuando se desarrollo el primer reloj manejado por un cristal de cuarzo por Horton y Morrison [2].

De todos los cristales conocidos, han sido los monocristales de cuarzo (dióxido de silicio SiO_2) los más populares para medir tiempo y frecuencia debido a su propiedades piezoeléctricas y mecánicas, así como por encontrarse en grandes tamaños y poder cortarse en rebanadas cuyas características de frecuencias de vibración son casi independientes de temperatura.

Los mejores relojes de cuarzo son altamente estables (10^{-13}), pero ellos no son tan buenos en la reproducción (10^{-7}) y no tan buenos en precisión, puesto que nuevos cristales usualmente tienen que ser calibrados experimentalmente contra otros patrones de frecuencia.

Relojes Atómicos

Aunque los relojes de cuarzo logran bastante estabilidad, la mayor precisión, reproducción y estabilidad han sido logradas con relojes atómicos, los cuales suministran ahora la base para definir el segundo como la unidad tiempo. La medida del movimiento periódico de los relojes atómicos resulta de la interacción magnética del núcleo de un átomo con sus electrones orbitales. Los núcleos de la mayor parte de los átomos están magnetizados como la aguja de una brújula; y así como un trompo cuando gira inclinado precesa alrededor de la vertical bajo la influencia de la gravedad, también precesa el núcleo alrededor del campo creado por el magnetismo electrónico. El eje y los momentos angulares de los movimientos rotatorios del núcleo y de los electrones y el movimiento de precesión resultante se ilustra en la figura 1.

Las frecuencias de precesión y los momentos angulares se expresan mejor en términos de la mecánica cuántica. Para los átomos que se usan más frecuentemente en los relojes atómicos, solamente dos estados de orientación relativa entre el momentum angular del núcleo y de los electrones son permitidos, uno en el cual se disponen paralelamente, y el otro antipalalelamente. Si la diferencia en energía entre los dos estados es $E_1 - E_2$, entonces la frecuencia de la precesión clásica corresponde a la frecuencia mecanico-cuántica

$$f = (E_1 - E_2)/h$$

Debido a que esta frecuencia de precesión se observó primero en espectroscopía óptica como una pequeña separación de las líneas espectrales, es a menudo llamada la frecuencia hiperfina. Es determinada por propiedades atómicas que son constantes en el tiempo (excepto para pequeñas variaciones debido a fluctuaciones externas de los campos eléctricos y magnéticos), y por lo tanto puede suministrar una excelente base para un reloj de alta precisión.

El primer método para medir con exactitud la frecuencia hiperfina fue suministrada por resonancia magnética de un rayo molecular (Fig.2). Fue de-

sarrollado en 1937 por I.I. Rabi y sus asociados [3]. El aparato es evacuado a una presión menor que 10^{-7} torr, para evitar colisiones de los átomos con el gas residual. Átomos de Cesio son los más comúnmente usados. Ellos se calientan en el horno para elevar su presión de vapor a un punto donde un buen número de ellos pasa a través del orificio del horno, formando un rayo. El campo inhomogéneo de un imán desvía el rayo, puesto que la fuerza en el polo norte del momento magnético dipolar de los electrones es diferente de la que actúa en el polo sur. El rayo pasa entonces a través de la parte principal del aparato donde experimenta un campo magnético estático débil y un campo magnético oscilatorio perpendicular, aún más débil que el anterior. Más allá de la región del campo los átomos son desviados nuevamente por un segundo campo magnético inhomogéneo. El rayo golpea entonces el alambre caliente ionizador de un detector, donde cada átomo dá un electrón y llega a ser un ión positivo que es contado eléctricamente. Si la frecuencia del campo magnético oscilante iguala la frecuencia hiperfina dada en la ecuación de arriba, la orientación del momentum angular de los electrones es reversada por el campo oscilatorio resonante; la fuerza sobre el átomo es a la vez reversada y el rayo sigue la trayectoria indicada con un máximo de la intensidad detectada. Si, por otro lado, la frecuencia del campo oscilatorio está lejos de la frecuencia hiperfina, no ocurrirá la reorientación resonante del momento magnético de los electrones, y el rayo será dirigido hacia abajo por el segundo imán inhomogéneo con el resultado de que la intensidad resultante decrecerá. La intensidad detectada puede entonces usarse a través de un circuito normal de retroalimentación para ajustar ligeramente la frecuencia de un oscilador de cristal de cuarzo, el cual suministra el campo magnético oscilante que induce la transición atómica. En esta forma, la frecuencia del oscilador es estabilizada a la frecuencia precesional interna del átomo.

En el método de resonancia de Rabi, el campo magnético oscilatorio se extiende uniformemente a lo largo de toda la región del campo magnético estático. Sin embargo, en 1949 Norman F. Ramsey demostró que había muchas ventajas en concentrar el campo magnético oscilatorio en dos regiones más cortas al comienzo y al final de la región con el campo magnético estático [4]. Las resonancias pueden entonces ser mucho más angostas, con lo cual el corrimiento Doppler de primer orden pudo ser eliminado. (El corrimiento Doppler de primer orden para ondas electromagnéticas es análogo al familiar aumento de tono en el zumbido de una locomotora que se acerca; corresponde a la compresión de las ondas a medida que la fuente se acerca al observador. El segundo orden del efecto Doppler es mucho más pequeño

que el primero, resultando del conocido efecto relativista de que relojes que se mueven rápidamente parecen andar más lento).

Aunque Rabi y sus asociados discutieron la posibilidad de relojes atómicos antes de 1945, muchos mejoramientos en años subsiguientes por Jerrold Zacharias y otros [3] fueron requeridos para lograr la actual exactitud de 10^{-13} . El reloj atómico de cesio fue tan superior a todos los relojes anteriores que en 1967 la definición internacional del segundo fue cambiada de una basada en el movimiento de la tierra alrededor del sol a la de 9.192.631.770 períodos del átomo de cesio.

Una variedad de dispositivos atómicos y moleculares fueron desarrollados en la década de los años 50 como posibles alternativas al rayo de cesio atómico [3]. Entre los más efectivos fueron aquellos que emplearon átomos tales como rubidio, almacenados en presencia de gases neutros amortiguadores, tales como helio en botellas cuyas superficies internas estaban cubiertas con vaselinas similares a dotriacontano ($C_{32}H_{66}$). Los átomos fueron ópticamente bombeados con luz polarizada circularmente en estados preferidos. Máseres de amoníaco (NH_3) (dispositivos para amplificar microondas por emisión estimulada de la radiación) fueron desarrollados por Townes y otros. Ninguno obtuvo tan gran precisión como los relojes de rayo de cesio atómico, pero cuando no se requiere tanta precisión, un reloj de rubidio ópticamente bombeado es a menudo usado a causa de su bajo costo y liviano peso.

Para muchos propósitos tales como medidas en radioastronomía, las cuales necesitan la estabilidad más alta posible en períodos de pocas horas, los mejores relojes que existen son máseres de hidrógeno (fig. 3), que fué inventado por Norman F. Ramsey y Daniel Kleppner en 1960 [5]. Una descarga eléctrica intensa en la fuente convierte hidrógeno molecular (H_2) disponible comercialmente en hidrógeno atómico (H). Los átomos emergen de la fuente a una región que ha sido evacuada a una presión por debajo de 10^{-6} torr. Un rayo de átomos divergentes entra en el imán selector de estado, el cual tiene tres polos nortes alternando en un círculo con tres polos sur. Por simetría, el campo magnético es cero en el eje de tal imán y aumenta hacia fuera del eje. El estado hiperfino de energía más baja del hidrógeno atómico, llamado el estado $F = 0$, tiene la característica de que su energía decrece con el aumento del campo magnético. Por lo tanto, los átomos en el estado de más baja energía se moverán lejos del eje donde sus energías son aún más bajas, esto es, el rayo de estos átomos se dispersará como se indica en la figura 3. Inversamente, la mayor parte de los átomos

en el estado de energía más alto $F=1$ serán empujados hacia el eje, y por consiguiente enfocados.

Átomos en el estado de energía más alto entran la pequeña apertura de la celda de almacenamiento, que consiste de un bulbo de pocos centímetros de diámetro cubierto con teflón en la parte interior. Si estos átomos son expuestos a radiación de micro-onda a la frecuencia hiperfina, la mayor parte de los átomos irán del estado de energía más alto al de más baja, y la energía liberada hará la radiación de micro-onda más fuerte, esto es, el dispositivo será un amplificador, un máser. Si la celda de almacenamiento es colocada dentro de una cavidad resonante, una oscilación a la frecuencia resonante será aumentada en magnitud hasta llegar a un punto de equilibrio, en cuyo nivel la oscilación continuará indefinidamente. La energía para mantener la oscilación viene del suministro continuo de átomos de hidrógeno en el estado de más alta energía.

El máser de hidrógeno atómico tiene alta estabilidad debido a la combinación de varios elementos. Los átomos residen en el bulbo de almacenamiento mucho más tiempo que en el aparato de rayo atómico, y por esto la línea de resonancia es mucho más estrecha. Ellos están relativamente libres mientras irradian, a diferencia de los átomos de la mayor parte de celdas de rubidio que colisionan con los átomos del gas amortiguador. El corrimiento Doppler de primer orden es corregido, ya que la velocidad promedio de los átomos almacenados en una botella por pocos segundos y que tienen la misma apertura para entrar y salir es extremadamente baja. Los máseres tienen muy bajos niveles de ruido, especialmente cuando el elemento amplificador es un solo átomo aislado.

La mayor desventaja del máser de hidrógeno es que los átomos colisionan con la pared frecuentemente, cambiando ligeramente la frecuencia hiperfina y dando lugar a un corrimiento de 2 partes en 10^{11} . El corrimiento de pared puede ser determinado experimentalmente por medidas con bulbos de diferentes diámetros o con un bulbo deformable cuya relación superficie a volumen puede ser alterada. Puesto que el corrimiento es constante, su existencia afecta más la precisión del máser que su estabilidad. En períodos de varias horas, la estabilidad del máser de hidrógeno es mejor que 1×10^{15} .

Futuros desarrollos

Pudiera parecer que hubiera poco espacio para mejorar en la medida de tiempo. Eso no es el caso. Los imanes selectores de estado de los relo-

jes de rayo atómico pueden reemplazarse por los rayos láseres, y los rayos de átomos pueden dirigirse a través de la región de transición en direcciones opuestas para reducir el efecto dañino de los corrimientos de fase. Nuevos materiales de recubrimiento que resulten en corrimientos de pared más pequeños y mucho más estables pueden desarrollarse con maseres de hidrógeno, incluyendo helio líquido superfluido y aceites tipo teflón o grasas.

Patrones atómicos de tiempo basados en láseres y otros dispositivos cuánticos similares están siendo desarrollados a frecuencias mucho más altas. El corrimiento Doppler de primer puede ser en estos casos más grande, pero varios métodos ingeniosos han sido ideados para reducirlo o eliminarlo. Espectroscopía de absorción saturada y espectroscopía de dos fotones emplean dos rayos láseres a la misma frecuencia pero de dirección opuesta de tal forma que los corrimientos de primer orden se cancelan [6,7]. Concurrente con el desarrollo de osciladores estables a muchas más altas frecuencias, se han dirigido esfuerzos también en la multiplicación y división de tales frecuencias, de tal forma que puedan hacerse comparaciones válidas entre los patrones a todas las frecuencias.

Aunque iones no pueden ser atrapados establemente en campos eléctricos estáticos, se sabe desde hace mucho tiempo que puedan ser atrapados en un campo magnético estático no uniforme en combinación apropiada con un campo eléctrico electrostático no uniforme (atrapamiento Penning) o en apropiados campos eléctricos no uniformes cuyas polaridades y gradientes alternan en sintonía con las radio frecuencias (atrapamiento Paul). Dehmelt y sus asociados [6] iniciaron el uso trampas para estudiar espectroscopía atómica. Puesto que los iones pueden almacenarse por largos intervalos en trampas y puesto que no hay efectos de pared, los iones atrapados ofrecen mecanismos prometedores para el desarrollo de patrones de tiempo y frecuencia. Hasta recientemente los iones tuvieron altas velocidades en las trampas y consecuentemente grandes corrimientos Doppler. Sin embargo, usados en combinación con el método de enfriamiento láser discutido arriba, las trampas de iones son muy efectivas.

Más recientemente, varias técnicas han sido inventadas para atrapar átomos neutros con rayos láseres no uniformes [7]. Las fuerzas resultan en algunos casos del gradiente de un campo eléctrico y en otros casos del momentum transferido al átomo cuando dispersa un fotón. Aunque algunas de las trampas son bastantes llanas, las técnicas de enfriamiento láser ayudan a vencer esta desventaja.

El enfriamiento láser es un método por el cual un rayo de luz pueden ser usado para amortiguar la velocidad de un átomo o ión [7]. Átomos han sido enfriados por láser a menos que 0.0003 K, y resonancias estrechas han sido observadas con un solo ión enfriado y atrapado. El enfriamiento por láser no solo elimina el ensanchamiento Doppler de primer orden sino también virtualmente el de segundo orden, el cual permanece en todos los relojes atómicos al menos que los átomos sean suficientemente enfriados.

Es demasiado prematuro decir que la combinación de trampas y enfriamiento será más efectivo, pero hay una alta probabilidad de que una o más de las nuevas técnicas que hemos examinado conducirán a una periodicidad aún más estable, que pueda a la vez suministrar la base para relojes atómicos aún más estables.

En un artículo posterior se discutirá de la necesidad actual de medidas precisas de tiempo, de las importantes pruebas que ha suministrado tanto de la teoría de la relatividad especial como de la general, y su implicación en la redefinición de muchos patrones de medidas basados en la unidad atómica de tiempo.

Referencias

- [1] D.S. Landes, en: *Revolution in Time*. Harvard Univ. Press, 1983.
- [2] W.G. Cady, en: *Piezoelectricity*. Dover, 1964.
- [3] N.F. Ramsey, en: *History of atomic clocks*. L. Res. NBS 88, 301. 1983.
- [4] N.F. Ramsey, en: *The method of successive oscillatory fields*. Physics Today 33(7), 23. 1978.
- [5] N.F. Ramsey, en: *The atomic hydrogen maser*. Am. Scientist 56, 420. 1968.
- [6] T.W. Hansch and Y.R. Shen, editores de: *Lasers Spectroscopy*. vol. 7. Springer-Verlag. 1985.
- [7] D.J. Wineland and W.M. Itano, en: *Laser cooling*. Physics Today 40(6), 34. 1987.

Descripción de figuras

En un artículo posterior se discutirá de la necesidad actual de medidas precisas de tiempo, de las importantes pruebas que ha suministrado tanto de la teoría de la relatividad especial como de la general, y su implicación en la redefinición de muchos patrones de medidas basados en la unidad atómica de tiempo.

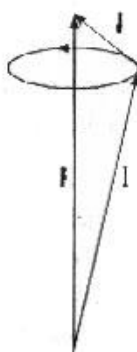


Fig.1 : Diagrama esquemático para mostrar el movimiento precesional clásico del núcleo de un átomo que interactúa magnéticamente con sus electrones: el vector I representa el momento angular del núcleo, J el de los electrones y F la suma de ellos. El movimiento precesional es mostrado por el círculo.

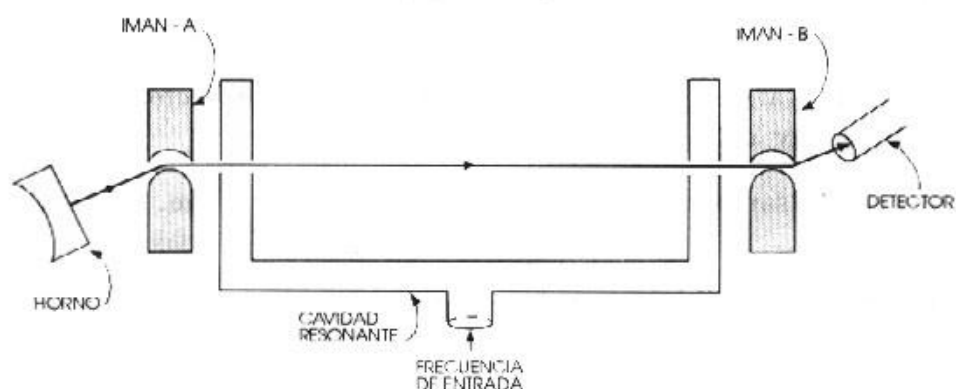


Fig.2 **RESONANCIA MAGNETICA DE UN RAYO ATOMICO:** Esquema de un aparato para medir la frecuencia hiperfina de átomos por resonancia magnética, mostrando el horno donde son evaporados los átomos, los imanes A y B que producen los campos magnéticos inhomogéneos

que desvían el rayo, la cavidad resonante y el detector donde los átomos son convertidos en iones positivos para ser contados eléctricamente.

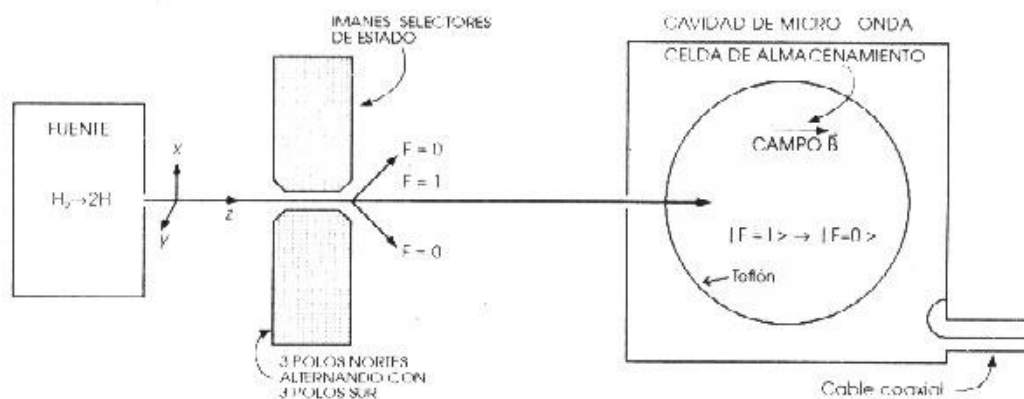


Fig.3 **MASER DE HIDROGENO ATOMICO**: Esquema de un máser de hidrógeno, mostrando la fuente de un rayo de hidrógeno atómico, el imán selector de estados y la celda de almacenamiento donde los átomos son expuestos a la radiación de micro-onda.