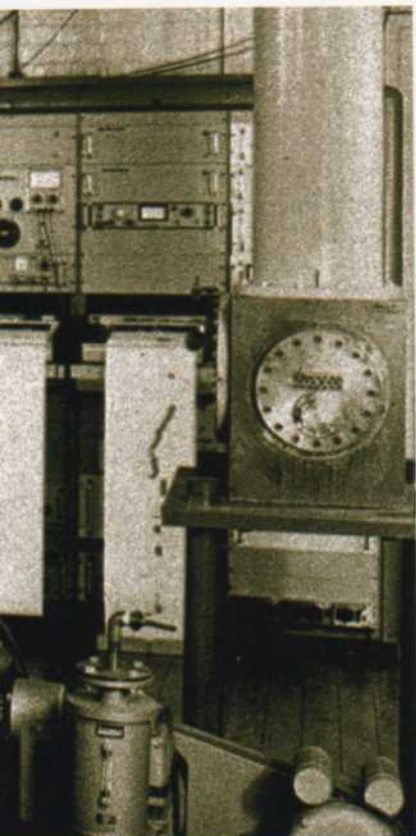


## Eduard Farré i Olivé **Mas allá del reloj** **relojes moleculares, atómicos e iónicos**

La idea de prescindir de la Tierra y de los relojes convencionales para fijar unas unidades de tiempo inmutables viene de lejos; desde que Huygens construyera los primeros relojes de péndulo sabemos que la Tierra no es un buen patrón ya que está sujeta a los movimientos irregulares derivados de la inclinación de su eje y a la elipticidad de su órbita; con los relojes de cuarzo aprendimos además que el eje de la Tierra trepida y con los relojes atómicos hemos sabido que el desplazamiento de las masas marítimas (mareas) y terrestres (terremotos) hace variar el giro del planeta diariamente.



Los científicos franceses creadores del sistema métrico decimal expresaron sus deseos de fundamentar las unidades de medida en fenómenos independientes del tiempo y del espacio, es decir, perennes y reproducibles en cualquier lugar del universo. El desarrollo de la teoría atómica en el siglo XIX condujo a la creencia que era mejor fijarse en los átomos que en la Tierra para establecer un sistema universal de medidas. Así lo expresaba Maxwell en su Tratado sobre Electricidad y Magnetismo de 1873: "la mejor unidad de tiempo podría basarse en el tiempo de vibración de una clase concreta de luz cuya longitud de onda fuese a su vez tomada como unidad de longitud". En la década de 1930, Isidor Rabi empezó a experimentar con el método de la resonancia magnética de un haz de moléculas y sugirió el cesio 133 como el mejor elemento para emplear en dicho método; sin

embargo, la tecnología para generar y controlar altas frecuencias estaba en sus inicios y hubo que esperar al desarrollo del radar a finales de la Segunda Guerra Mundial para contar con el instrumental adecuado para la manipulación de las microondas. Los experimentos preliminares que desembocarían en la aparición del reloj atómico, comenzaron en 1934 con los ensayos llevados a cabo por Cleeton y Williams sobre las oscilaciones de la molécula de amoníaco. Sin embargo, el uso de tal oscilador para la generación de frecuencias de reloj no tuvo lugar hasta 1948, cuando Harold Lyons pudo aprovechar la reciente madurez de los equipos y técnicas propias de las microondas para construir el primer reloj de gas de amoníaco.

Para ser precisos, el reloj de amoníaco debería ser designado como reloj "molecular" y no "atómico" ya que el elemento oscilador es la molécula compuesta de átomos de nitrógeno e hidrógeno; sin embargo en la práctica se incluyen los relojes moleculares bajo la denominación genérica de atómicos.


Podemos tranquilizar al lector desmintiendo el más inmediato de los errores en los que puede caer: los relojes atómicos no utilizan la energía nuclear ni su funcionamiento tiene nada que ver con la fisión o fusión de los átomos ni con la radioactividad; al contrario, solamente los elementos estables, o sea no radioactivos, pueden servir como patrones del tiempo. Básicamente, un reloj atómico consiste en un oscilador, o reloj, de cuarzo de muy alta calidad cuya frecuencia de vibración es regulada y mejorada en gran medida por un resonador de átomos o moléculas de un determinado elemento o compuesto químico.

Supongamos un reloj de cuarzo de laboratorio cuya precisión fuera de un segundo por año al que se le ha acoplado un resonador de átomos de cesio cuya estabilidad fuera 300 veces mayor que la del oscilador de cuarzo; en consecuencia tendríamos un reloj capaz de dar la hora con la

precisión de un segundo cada 300 años. Pues bien, éste fue exactamente el resultado que obtuvieron L. Essen y J.V.L. Parry en 1955 al dar forma definitiva al primer reloj atómico de cesio en el National Physical Laboratory en Teddington, GB.

En el interior de un tubo resonador de cesio se encuentran varios elementos básicos: en primer lugar hay un horno eléctrico S que calienta el cesio 133 metálico hasta evaporarlo (el cesio 133 no es radioactivo, a diferencia de sus isótopos 137 y 138 utilizados en radiología). Dichos vapores de cesio son dirigidos a lo largo del tubo en un haz continuo de átomos; al salir del horno los átomos atraviesan un campo magnético SE que aparta del haz los átomos que no se encuentran en un estado magnético determinado, dejando así que continúen en el haz únicamente los átomos adecuados. Estos átomos penetran a continuación en una cámara de resonancia C que oscila a 9.192.631.770 Herz. Tal frecuencia es capaz de modificar el estado magnético de la mayoría de los átomos que han penetrado en dicha cavidad, a la salida de la cual, atraviesan un nuevo campo magnético A que aparta del haz los que no fueron excitados en la cavidad. De este modo, sólo llegan al detector final D los átomos excitados; el detector AS los cuenta y el generador OS modifica la frecuencia de la cavidad resonante hasta conseguir que la cantidad de átomos excitados, y por tanto detectados, se mantenga a un nivel máximo. Con esta maniobra de autoregulación se consigue que la frecuencia de la cavidad resonante se mantenga en el valor necesario para conseguir la máxima excitación, con una inestabilidad equivalente a un segundo en varios milenios.





En 1952 Townes hizo funcionar el primer maser (contracción del inglés equivalente a "Amplificación de Microondas por Estimulación de la Energía de Radiación") de amoníaco, y en 1960 Norman Ramsey, quien ya había preconizado el principio de las cavidades resonantes utilizadas en patrones de cesio puso a punto el maser de hidrógeno atómico. En 1989, Ramsey obtuvo el Premio Nobel de Física por sus importantes contribuciones para el desarrollo del espectroscopio atómico de precisión. El desgaste de las piezas en los relojes mecánicos y el envejecimiento del cristal en los relojes de cuarzo ponen un límite insalvable al aumento de su precisión; contrariamente, los átomos y las moléculas no envejecen, o por lo menos, su estabilidad supera en millones de veces la de los dispositivos macroscópicos oscilantes. Esto se explica porque las fuerzas que aseguran la estabilidad de cuerdas, muelles, diapasones o cristales oscilantes sólo son ligeramente superiores a las fuerzas

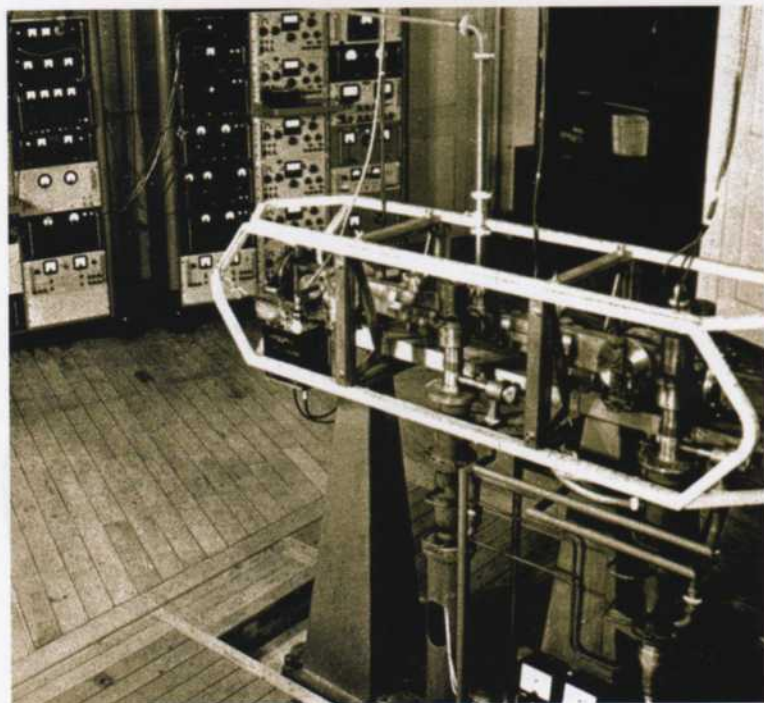
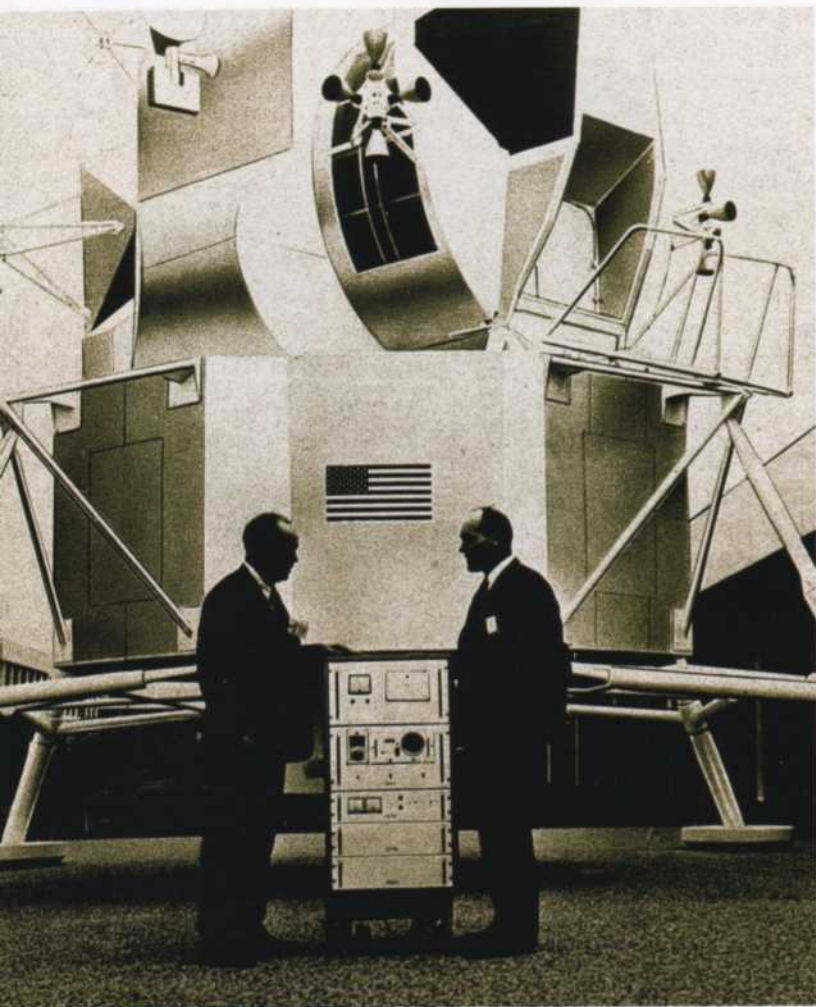
de 1.420.405.751 Herz, en el de cesio de 9.192.631.770 Herz y en el de amoníaco es de 23.870.129.300 Herz. La enorme precisión con la que podemos medir el tiempo, gracias a los relojes atómicos, ha influido en modo decisivo en muchos campos de la física y de la vida cotidiana. Por citar solamente unos pocos, recordemos el establecimiento de la escala de Tiempo Atómico Internacional que independiza la magnitud "tiempo" de las fluctuaciones de los cuerpos celestes, las nuevas definiciones del "segundo" (1967) y del "metro" (1983) que dependen del Tiempo Atómico; la demostración práctica de la paradoja de los gemelos de la Teoría de la Relatividad, llevada a cabo con sendas balerías de relojes atómicos estáticos y en vuelo alrededor de la tierra respectivamente; la medida de la vida de partículas subatómicas en los aceleradores lineales que, en muchos casos, es de pocas millonésimas de segundo; la medida de la distancia entre la Tierra y la Luna con precisión de centímetros; y finalmente, la difusión del Tiempo Atómico a los relojes receptores personales por la vía de las ondas herzianas.

## Cuando Einstein formuló su Teoría de la Relatividad poco podía imaginar que muy pronto la curiosa paradoja de los gemelos se podría comprobar con el empleo de relojes atómicos.

exteriores capaces de desafinarlos. En cambio las fuerzas que actúan en los microsistemas, átomos y moléculas, son tan grandes que las fuerzas exteriores (temperatura, presión, golpes, etc) son prácticamente imperceptibles y no influyen en su estabilidad. Además, la frecuencia de las oscilaciones electromagnéticas que emiten los átomos y las moléculas es extraordinariamente mayor que la de los osciladores convencionales: en los relojes, un péndulo oscila entre 1 y 2 Herz; (oscilaciones por segundo), un volante entre 2 y 5 Herz, un diapason entre 300 y 360 Herz, un cristal de cuarzo típico 32.768 Herz y un cuarzo de laboratorio puede tener una frecuencia de unos 2.000.000 Herz. En cambio, en el reloj de hidrógeno la frecuencia de dicho elemento es

La investigación en este campo no se detiene; por lo que estas líneas ya están superadas en el momento de escribirlas, sin contar que la tecnología de la precisión asociada a la militar convierten en materia secreta los últimos descubrimientos, teniendo solamente cierta trascendencia los penúltimos adelantos o los completamente obsoletos. En este sentido, conocemos la existencia del último reloj divulgado por los laboratorios de vanguardia de los Estados Unidos y de Europa que es el llamado NIST-F1 o Reloj Atómico de Fuente de Cesio, un oscilador en el que se hallan implicados el gas de cesio, la cavidad de microondas y los detectores de láser, todo ello en una temperatura cercana al cero absoluto. Para quien desee ilustrarse más en este tema le recomendamos visitar la página [www.boulder.nist.gov/timefreq/cesium/fountain.htm](http://www.boulder.nist.gov/timefreq/cesium/fountain.htm) donde hallará una descripción completa del

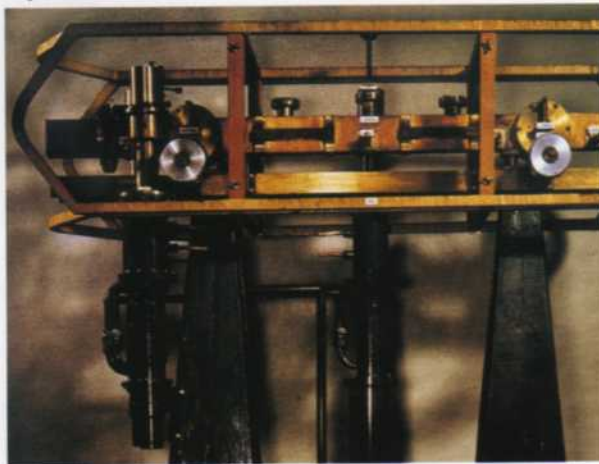
Presentación del reloj de cesio de Ebauches, S.A. frente al módulo lunar en Houston, Texas en 1970.



funcionamiento del oscilador con imágenes animadas incluidas. Para un futuro cercano nos anuncian que está en proceso la investigación sobre un nuevo "Reloj Óptico", también llamado monoiónico, que promete una precisión 1000 veces mayor que el mejor de los actuales. Este reloj está basado en la transición de energía de un simple ion de mercurio (un átomo de mercurio que ha perdido un electrón) atrapado en una cámara magnética donde vibra a una frecuencia de mil billones de hertz. Como parece ser que el mercurio no proporciona el resultado óptimo se



Esquema del oscilador de cesio.



El NPL-1, primer reloj de cesio del National Physical Laboratory, rodeado de sus instrumentos de control.

## Su precisión alcanza el segundo en 20 millones de años.

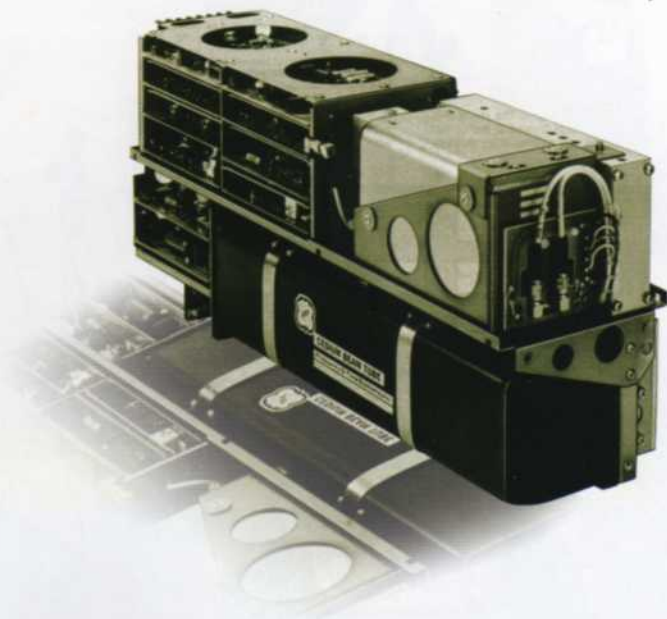
experimenta también con iones de indio y de calcio.

El NIST comunica que está trabajando en el proyecto PARCS (Reloj Primario Espacial de Referencia Atómica) para instalar un reloj de fuente de cesio en la Estación Espacial Internacional a finales de 2005. Se espera que la estabilidad del reloj aumente considerablemente al quedar liberado del campo gravitatorio de la tierra.

Otro sistema de reloj atómico desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA) bautizado con el nombre de proyecto ACES y "Faraón" está previsto que se instale en la estación espacial en 2005 y ya se ha previsto su sustitución por un reloj de rubidio hacia 2008 (proyecto RACE).

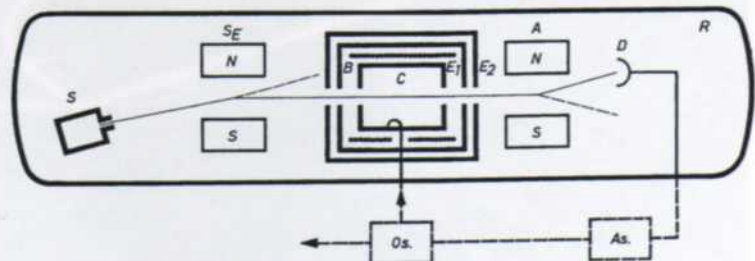
Las dificultades que se van salvando con los años, no solamente tienen que ver con la excitación y el mantenimiento de los osciladores atómicos, con la precisión de las medidas aplicadas a tan elevadas frecuencias sino también con la estabilidad y la permanencia de las frecuencias y con los métodos para transmitirlos con la máxima fiabilidad. Las dificultades son máximas al aproximarse a las altas precisiones de los relojes atómicos de última generación ya que los efectos relativistas predichos por Einstein se ponen cada vez más claramente de manifiesto; la paradoja de los gemelos predice que el viajero envejece menos que el que permanece estático; en el caso de los muy sensibles relojes atómicos solamente al ser desplazados a pequeñas velocidades ya experimentan los efectos relativistas atrasando unas pequeñas fracciones de segundo - es decir envejeciendo menos que otro reloj idéntico pero

1. El NPL-3, el tercer reloj de cesio del National Physical Laboratory.



estático - ; la misma teoría de la relatividad enuncia que los campos gravitatorios también afectan el envejecimiento y en los laboratorios de relojería atómica, se han llegado a observar diferencias entre relojes situados en pisos distintos del mismo edificio o a detectar - por los atrasos o adelantos de los relojes - los cambios gravitatorios producidos por los movimientos de las placas tectónicas, por las mareas y por el

desplazamiento del magma situado a cientos de metros bajo la corteza terrestre. Así el reloj atómico no solamente ha puesto de manifiesto hechos físicos hasta ahora solamente teorizados sino que su propia evolución y los predecibles aumentos de precisión que se pueden producir en el futuro se verán limitados por las mismas fuerzas de la naturaleza que ha puesto en evidencia.



2. El oscilador de cesio del reloj de Ebauches, S.A.

**BONANOMI, JACQUES et SCHUMACHER, P.:**

Synchronisation d'horloges par signaux horaires. "La Suisse Horlogère", 11, 11/3/1976

**BONANOMI, JACQUES:**

Les horloges atomiques. Lausanne: Actes du Congrès Internationale de Chronometrie, 1964

**BRANDERBERGER, H.:**

Horloge atomique avec tube a cesium. "Actes du Congrès Intern. de Chronometrie", Lausanne 1964

**BUSCA, G.:**

Preliminary measurements on EFOS 1 H maser. "Proceedings of the 36th annual control sympos.", Philadelphia 1982

**BUSCA, G. AND THOMMEN, P.:**

The EFOS hydrogen maser: Characteristics for VLBI applications. "Proceedings of the International Conference on Very Long Baseline Interferometry Tech.", Toulouse 1982

**CALDER, N.:**

Atomic clocks. "New Scientist", 1958

**DECAUX, BERNARD - GUINOT, BERNARD:**

La mesure du temps. Paris: Presses Univers. de France, 1969; Col. Que sais-je? n. 97

**FANSELOW, J.L.:**

VLBI and its current applications within the solar system h maser. Proc. 9th Annual Precise Time and Time Interval (P.T.T.I.) Conference p. 85-95, Fort Monmouth N.J. USA: U.S. Electronic Command, 1978

**FORMAN, PAUL:**

Atomichron: The Atomic Clock from Concept to Commercial Product. IEEE, 1998

**GIBBS, W. WAYT:**

Medición actual del tiempo. "Investigación y Ciencia", Noviembre 2002, p. 62-69.

**McCOUBREY, ARTHUR O.:**

History of atomic frequency standards: a trip through 20th century physics. Proceedings of the IEEE International Frequency Control Symposium 1996 (p. 1225-1241)

**ORTE, A.:**

La hora oficial española. "Revista General de Marina", octubre 1976

**STEINER, CLAUDE:**

Les horloges atomiques. "La Suisse Horlogere" fev-mars 1967

**SULLIVAN, D.V.:**

Time and frequency measurement at NIST. The first 100 years. IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition, 2001

## Cronología de la evolución del reloj atómico

**1917** A. Einstein formula la concepción teórica de la emisión estimulada de radiaciones.

**1928** Warren A. Marrison, ingeniero de los Laboratorios Bell (USA), construye el primer reloj de cuarzo.

**1934** Cleeton y Williams realizan los primeros ensayos sobre las oscilaciones de la molécula de amoníaco.

**1940** Fabrikant concibe el maser.

**1945** Isidor Rabi sugiere la construcción de un reloj basado en la técnica de un haz atómico sometido a resonancia magnética que había estado experimentando durante la década anterior para mejorar la estabilidad de un oscilador de cuarzo.

**1948** Harold Lyons y sus colaboradores del National Bureau of Standards (NBS) de Washington construyen el primer reloj molecular de amoníaco.

**1952** Se realizan las primeras observaciones sobre la transición del cesio en el NBS y se anunció la construcción de un reloj atómico experimental basado en el cesio, el NBS-1.

**1955** L. Essen y J. V. L. Parry construyen el primer reloj de cesio en el National Physical Laboratory (NPL) de Teddington (GB) que servirá ya de patrón frecuencias y de tiempo.

**1954-58** Markowitz deduce que la unidad vigente del segundo astronómico equivale a 9.192.631.770 oscilaciones de la transición del átomo de cesio.

**1958** A. Kastler construye el primer reloj atómico de rubidio. Aquel año se pusieron a la venta los primeros relojes de cesio comerciales al precio de 20.000 dólares.

**1960** N. Ramsey, M. Goldenberg y D. Kleppner construyen el primer maser de hidrógeno atómico.

**1966** Alfred Kastler recibe el premio Nobel de Física por su contribución a la medida atómica del tiempo.

**1967** La 13a Conferencia General de Pesos y Medidas toma la resolución siguiente: "El segundo es la duración de 9.192.631.770 períodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133".

**1971** La 14a Conferencia General de Pesos y Medidas adopta la resolución relativa al establecimiento de la escala de Tiempo Atómico Internacional.

**1975** El 6º reloj construido por el National Bureau of Standards (el NBS-6) ofrece la precisión de un segundo en 300.000 años.

**1983** La 17a Conferencia Internacional de Pesos y Medidas adopta una nueva definición del metro en base a la longitud del trayecto recorrido en el vacío por la luz durante la fracción 1/299.792.458 del segundo de Tiempo Atómico.

**1989** El Premio Nobel de Física se otorga a Norman Ramsey, Hans Dehmelt y Wolfgang Paul por sus contribuciones en el desarrollo de los relojes atómicos 1993 Entra en funcionamiento el reloj atómico NIST-7 con una precisión 20 veces mayor que su antecesor el NBS-6 (El National Bureau of Standards, NBS, cambió su nombre por el de National Institute of Standards and Technology, NIST).

**1999** El NIST-7 es substituido por el NIST-F1 que tiene un error máximo atribuido de un segundo en 20.000.000 de años

**2003** El NIST anuncia que está llevando a cabo su proyecto de investigación sobre el Reloj Óptico o monoiónico.BI