

UN TIEMPO PARA LA REFLEXIÓN

ALBERTO GALINDO TIXAIRE *

* Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Departamento de Física Teórica. Facultad de Ciencias Físicas. Universidad Complutense. 28040 MADRID. agt@fis.ucm.es.

I. INTRODUCCIÓN

Despojemos al tiempo de su relación con los sentidos, los recuerdos y las esperanzas, y el tiempo se desvanecerá. Persistirá, a lo más, una idea difusa, que los científicos idealizan a los puntos de una recta indefinida —la (semi) eternidad tal vez— con los que secuencian sucesos, y que muchos mortales, que van generalmente más al grano, bautizan como “lo que impide que todo ocurra de vez”.¹ Nadie, sin embargo, ha conseguido una definición del tiempo tan hermosa y sugerente, y tan menos operacional, como la de Platón: *el tiempo, dijo, es una imagen móvil de la eternidad*.

Lamentábase nuestro Quevedo en sus poesías graves de la fragilidad de la vida humana, y de que *el tiempo, que ni vuelve ni tropieza, / en horas fugitivas la devana*. Poco han aliviado en esto los siglos al hombre; queríamos detener el presente, corregir el pasado y alejar el futuro, ni más ni menos como deseara un cazador del neolítico o un ciudadano ateniense.² Pero no es este tiempo, sobre el que la ciencia física mantiene por ahora imperturbable mudez, el que acaparará nuestra atención. El tiempo que les ofreceremos para pensar será el tiempo físico, el tiempo que miden los relojes. Incluso este elemental tiempo nos resulta desconocido. Preguntas como ¿tiene el tiempo una existencia propia, o es mera invención conceptual



Figura 1. El dios Aión, o Eón, encargado de hacer girar la rueda zodiacal.

del hombre?, ¿se trata, acaso, de un fenómeno emergente?, etc., quedarán en el aire.

Por la limitada disponibilidad de nuestro elemento protagonista, el tiempo, no atenderemos temas como las zambullidas en agujeros negros, la Gran Explosión y el “antes” de la creación “desvelado” por la cosmología actual, las flechas del tiempo, el borrado cuántico del pasado, y, por qué no, las máquinas del tiempo, esos locos cacharros que nos gustaría tener a mano para movernos a nuestro antojo por los desvanes de la mansión de Aión (Fig. 1).³

* Este texto fue esencialmente escrito en el primer semestre de 2012.

¹ R.K. Cummings, en *THE GIRL IN THE GOLDEN ATOM*, Univ. of Nebraska Press (1922), ya escribió: *Time...is what keeps everything from happening at once*.

² Escribía Flaubert en una carta a Louise Colet: *L'avenir nous tourmente, le passé nous retient, c'est pour ça que le présent nous échappe*.

³ Para los griegos Cronos, Eón o Aión, era la personificación mitológica del tiempo eterno, el dios de las “edades”.

La precisión en la medida del tiempo no solo es la enseña actual del avance tecnológico, sino que además ha tenido, históricamente, repercusiones económicas indudables. Recordemos el atractivo premio en metálico con que el Parlamento inglés pagó a Harrison a comienzos del XVIII por construir un reloj capaz de permitir medir la longitud geográfica con error menor de 30 millas tras cruzar el Atlántico en mes y medio de viaje. Tal era la importancia estratégica y comercial de una determinación precisa de la longitud en alta mar.

Como ejemplo bien conocido en la actualidad, tenemos el sistema de posicionamiento global (GPS). Sin los avances en la medida del tiempo y sin el conocimiento preciso que del efecto sobre este produce el movimiento y la gravitación, el GPS no cumpliría su objetivo. En el año 2005 se medían los tiempos con error de un segundo cada 80 millones de años (3 partes en 10^{15}). Hoy hay relojes de lógica cuántica con exactitud de un segundo en 3.7 mil millones años (esto es, 1 parte en 10^{17}), y es de esperar que en poco tiempo se mejorará esta, llegando a una parte en un trillón. Con estos relojes atómicos ópticos, operativos en uno o dos lustros, el GPS dará nuestra localización con error menor de un metro en tiempo real, los aviones podrán aterrizar solos, la navegación de las sondas espaciales será mucho más precisa, se podrán medir mejor los efectos relativistas, se impulsarán las redes de telescopios espaciales para detectar ondas gravitatorias, veremos si lo que hoy llamamos constantes físicas fundamentales son en realidad constantes en el espacio/tiempo, y posiblemente habrá que redefinir el segundo y el metro. De momento, ya se ha medido el efecto de dilatación gravitacional del tiempo con precisión que supera mediciones anteriores en cuatro órdenes de magnitud, y, como curiosidad, se ha podido medir cuánto más envejece nuestra cabeza que nuestros pies.

En torno a estas y otras cosas del tiempo trató la conferencia cuyo texto presentamos a continuación.

II. TIC, TAC, TIC, TAC,...

Desde la más remota antigüedad los seres humanos han intentado medir el tiempo lo mejor posible, organizándolo en calendarios con unidades (días, meses, años) a las que referir sucesos ocurridos en el pasado o

por ocurrir en un futuro próximo. Aunque mucho menos esclavos del tiempo que nosotros, en las comunidades agrícolas era muy importante saber cuándo comenzaban y terminaban las estaciones, cuándo llegarían las lluvias o cuándo se desbordarían los ríos, cuáles eran los tiempos de siembra y de recolección, etc; también las sociedades nómadas requerían medir el tiempo para programar sus desplazamientos. Y todos sin distinción echaban mano de sus calendarios para fijar las fiestas sagradas.

Para ello nuestros antepasados recurrieron a los astros, especialmente al Sol, cuya gran regularidad en su movimiento en torno a la Tierra y disponibilidad para todos le hacían indiscutible; a la Luna, con un período más cómodo para usar; y a las estrellas, sin rival en la noche.

Podríamos tomar como día aproximado el llamado día solar local aparente, a saber, el intervalo de tiempo entre dos cruces consecutivos del Sol sobre nuestro meridiano — los griegos ya sabían que estos días no eran todos iguales, y que a efectos astronómicos había que corregirlos. Más adelante definiremos exactamente lo que hoy llamamos día. Por el momento, la definición anterior nos basta. Estos días se dividen en intervalos iguales de 24 horas, y se reúnen en años de 365 días, el tiempo que tarda la Tierra en dar una vuelta completa alrededor del Sol; en realidad, este tiempo es algo mayor, en aproximadamente $1/4$ de día. De ahí la necesidad de los bisiestos. En cuanto a los meses, aprendimos a dividir el año en 12 meses, de 28, 29, 30 o 31 días, unas longitudes sugeridas por las de los meses lunares (en desuso dentro del mundo occidental).

A. Sol, arena y agua

1. Relojes de sol

Los grandes obeliscos egipcios no sólo eran ornamentales y símbolos religiosos; su sombra servía para señalar el mediodía (cuando alcanzaba su longitud mínima) y con ello dividir el día en dos mitades, así como indicar los días más largos y más cortos del año (según que la longitud de la sombra a mediodía fuese la más corta o la más larga de todo el año). En la Fig. 2 se representan los extremos de las sombras entre los

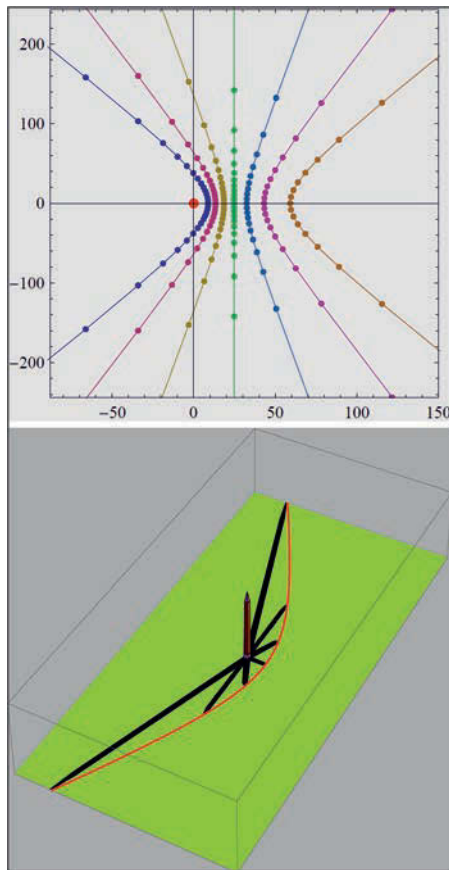


Figura 2. Longitudes de las sombras a la latitud de Madrid. Obelisco y sus sombras en el solsticio de junio a las 8, 10, 12, 14, 16 y 18 horas solares, latitud de Madrid.

solsticios, con intervalos de un mes aproximadamente, para una latitud como la de Madrid. A lo largo de cada día, esos extremos se hallan sobre un arco de hipérbola; en los equinoccios ese arco se convierte en un segmento rectilíneo.⁴ Como curiosidad para los madrileños, cuando el Sol alcanza el cenit, la longitud de la sombra, en unidades de la altura del obelisco o de un gnomon vertical cualquiera, es 0.31 en el solsticio de verano, 0.85 en los equinoccios, y 2.0 en el solsticio de invierno. En la parte inferior de la figura, se muestra el esquema de un obelisco en Madrid y sus sombras (en Madrid) para el solsticio de verano, en intervalos de dos horas. En unidades de la altura del obelisco, esas sombras miden 0.31 (mediodía), 0.59 (dos horas antes o después), 1.3 (cuatro horas), 3.7 (seis horas).

Estos obeliscos se remontan a unos 3500 años a.C. Unos dos mil años más tarde aparecieron los relojes de

sol, que, basados en la posición de la sombra de una varilla, estilete o gnomon proyectada sobre una superficie por la luz del sol, figuran entre los instrumentos más antiguos empleados para medir el tiempo. Se apoyan en la notable regularidad del movimiento rotatorio de la Tierra en torno a su eje; el periodo de este giro es lo que denominamos de ordinario como día, y su venticuatroava parte, la hora, es el tiempo requerido para girar 15° . Basta, por tanto, seguir los siguientes pasos para diseñar un reloj de sol que marque las horas solares (los cambios a realizar en las instrucciones son triviales si se desea que marque otros periodos de tiempo, como medias y cuartos de hora, etc): 1/ colocar el gnomon G paralelo (o antiparalelo) al eje de rotación terrestre (lo que corresponde muy aproximadamente a orientarlo hacia la estrella polar); 2/ considerar un haz H de 12 planos $P_j, j=0, \dots, 11$ (entre ellos el plano meridiano P_0) con eje el gnomon, y formando entre sí ángulos diedros consecutivos iguales a 15° ; 3/ fijar un plano P que no contenga a G , sobre el que se van a producir las sombras de este al ser iluminado por el Sol; y 4/ marcar las intersecciones t_j de este plano P con los planos P_j del haz H , y marcarlas. Cuando la sombra de G pase por una de esas intersecciones t_j , habrá una diferencia de j o $j-12$ horas con el mediodía solar.

Hay un pequeño problema. Construido así un reloj de sol, su tiempo, conocido como tiempo solar aparente (t_{tsa}), no coincide exactamente con la hora oficial. El Sol no está en lo más alto cuando nuestro reloj de pulsera marca las 12 —o las 13 en la España Peninsular, Baleares, Ceuta y Melilla, donde nos regimos por el Tiempo Central Europeo (CET), que añade una hora al Tiempo Universal Coordinado (UTC), esto es, $\text{CET} = \text{UTC} + 1$, o las 14 horas si estamos en horario de verano (CEST). Aunque hagamos esta trivial corrección, la hora solar aparente puede diferir de la hora oficial hasta más/menos un cuarto de hora, aproximadamente, según la época del año. Sólo coinciden cuatro días al año. En 2012, año bisiesto, esos días son el 15 de abril, 13 de junio, 1 de septiembre, y 25 de diciembre; el 12 de febrero se produce el mayor retraso ($-14\text{m}15\text{s}$), y el 3 de noviembre el mayor adelanto ($+16\text{m}25\text{s}$). Estas diferencias horarias son fundamentalmente debidas a la excentricidad ($e_T = 0.01671022$) y a oblicuidad ($\epsilon_T =$

⁴ Para grandes y extremas latitudes, esos arcos pueden llegar a ser elípticos e incluso circulares.

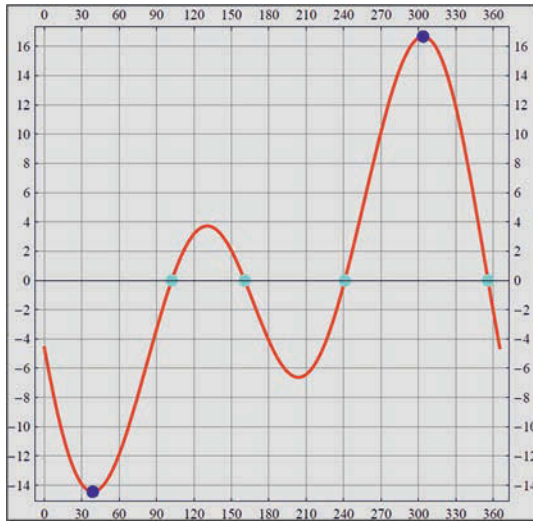


Figura 3. Ecuación del tiempo en esta época en torno al año 2000. El origen de abscisas marca el pasado instante, 5 de enero de 2012, en que el Sol alcanzó su periápside en torno a la Tierra. El extremo de abscisas marca el tiempo, en días, del año trópico. En ordenadas, la diferencia de tiempo solar y solar medio, en minutos.

23.4398°) de la órbita terrestre, que originan una diferencia entre los tiempos asociados al movimiento aparente del Sol y los tiempos solares medios asociados a un Sol ficticio que orbitase con velocidad angular constante, o si se quiere, un tiempo proporcional al área barrida por el vector Tierra-Sol (segunda ley de Kepler). Esta diferencia es

$$\Delta t := t_{\text{sa}} - t_{\text{MST}} = (T/2\pi)\Delta\alpha, \quad (1)$$

$$\Delta\alpha = \lambda_p + M - \arctg \left[\cos(\varepsilon_T) \sin(\lambda_p + \nu(M)) \right],$$

donde: $1/t_{\text{MST}}$ denota el tiempo solar medio; $2/\lambda_p$ es la longitud eclíptica del Sol al llegar al periápside de su órbita elíptica relativa a la Tierra el 5 de enero de 2012, a las 00:31.5 UTC, de valor 283.085°; $3/M$ es la anomalía solar media; y $4/\nu(M)$ es la anomalía solar verdadera. Ésta, a su vez, es función de la anomalía excéntrica E , relacionada con la anomalía media M a través de la ecuación de Kepler:

$$\nu(M) = 2 \arctg \left[\sqrt{(1+e_T)(1-e_T)} \tan \frac{1}{2} E(M) \right], \quad (2)$$

$$M = E(M) - e_T \sin E(M).$$



Figura 4. Reloj solar ecuatorial en la Ciudad Prohibida de Pekín.

Para las funciones \arctg que figuran en las dos ecuaciones anteriores, se toma la determinación continua que arranca del valor 0 cuando su argumento es nulo. En la Fig. 3 puede verse la ecuación del tiempo para este año 2012. No cambia apreciablemente en un entorno de varias décadas.

Los relojes de sol más sencillos de construir son los llamados “ecuatoriales”, para los que el plano del reloj es perpendicular al gnomon, y por tanto, paralelo al ecuador terrestre (ver Fig. 4).⁵ En estos, las líneas horarias están equiespaciadas de 15° en 15°, a partir de la del mediodía.

Los relojes de sol tienen una limitación obvia: no funcionan de noche, ni en días nublados. Podríamos reemplazar el Sol por la Luna; de hecho, también se construyen relojes de luna. Pero el movimiento lunar es bastante más complejo y menos uniforme que el solar. Los relojes de luna sólo funcionan bien las noches de plenilunio; antes (a partir) de ellas, adelantan (retrasan) 48 minutos cada día, llegando a acumular en una semana más de cinco horas y media de diferencia.

2. Relojes de agua

Nuestros antepasados suplieron los inconvenientes mencionados de los relojes basados en las sombras con

⁵ Los egipcios usaron unos relojes de sol consistentes en dos maderas cruzadas en forma de T tumbada; la sombra del travesaño, yacente sobre el meridiano, en el palo largo (dirigido sobre el paralelo en la dirección opuesta al Sol) iba recorriendo este al moverse aquel, y unas muescas en el palo horizontal marcaban las horas. Al mediodía se le daba media vuelta.

otros dispositivos para medir el tiempo, como son los relojes de agua o clepsidras (“ladrones de agua”), y los relojes de arena. Los egipcios ya los usaban allá por los años 1500 a.C. Los relojes de agua se calibraban con ayuda de los relojes de sol, y consistían en vasijas tronco-cónicas, parecidas a macetas, con paredes inclinadas, y un orificio en la base por el que se escapaba el agua de modo que el nivel de líquido en la clepsidra disminuía a ritmo suficientemente uniforme. Los cambios observados en el nivel del agua servían para estimar el tiempo transcurrido. Suponiendo vasijas de revolución, y condiciones ideales (incompresibilidad, y ausencia de viscosidad), se puede demostrar que el descenso de nivel varía uniformemente con el tiempo si y solo si el perfil de la vasija satisface

$$r \propto h^{1/4}, \quad (3)$$



Figura 5. La clepsidra de Karnak, y una clepsidra teórica.

siendo r el radio de una sección horizontal a altura h sobre la base.⁶ En la Fig. se muestra una réplica fiel de la famosa clepsidra de Karnak, y una vasija, de proporciones similares, pero con el perfil teórico (3).

3. Relojes de arena

El uso de líquidos dificultaba la portabilidad de estos relojes de agua. Por eso se recurrió también al uso de material granular, como la arena, en los relojes familiares que llevan este nombre: constan de dos depósitos simétricos, de cristal transparente, comunicados por un angosto paso por el que la fina arena pasa de la cámara superior a la inferior. Transcurrido el proceso (unidad de tiempo), se invierte el reloj para dar comienzo a la siguiente unidad.

La precisión de estos relojes primitivos era más bien baja; del orden de media hora al día, es decir, de un 2%.

B. Escape y péndulo

Antes de continuar con los relojes, hagamos un breve intermedio para refrescar algunos conceptos.

1. Intermedio: unidades de tiempo

1. Creyendo que la rotación de la Tierra sobre su eje era sumamente uniforme a lo largo del tiempo, y por tanto un movimiento periódico fiable y conveniente para medir el tiempo, desde el año 1000 (con al-Biruni) hasta 1960 se definió el *segundo* como el *segundo solar medio*: la fracción $1/86\,400$ del *día solar medio* (promedio anual del tiempo que tarda el Sol en pasar sobre el meridiano de un lugar dos veces consecutivas).⁷

⁶ A. A. Mills, *Newton's Water Clocks and the Fluid Mechanics of Clepsydrae*, Notes and Records of the Royal Society of London **37**, No. 1, 35-61 (1982).

⁷ Los astrónomos babilonios y griegos sabían ya que los días solares no son todos de igual duración a lo largo del año (variaciones entre unos días y otros de hasta 30 s), por lo que individualmente no eran referentes adecuados para definir el tiempo, y aunque no manejaron ni el minuto ni el segundo, sí usaron el sistema sexagesimal para dividir la circunferencia. La división del día en 24 horas es un legado egipcio; esferas de relojes con la división de las horas en 60 minutos (e incluso de estos en 60 segundos) aparece a finales del XV y a lo largo del XVI, aunque su medida real no se implementó hasta finales del siglo XVII, cuando los relojes de péndulo hicieron posible la medición de estos lapsos de tiempo.

2. Pero tampoco el día solar medio permanece constante a lo largo de los años. El período de rotación de la Tierra va creciendo poco a poco (en la actualidad a un ritmo de 1.4 ms/año). Esto llevó a redefinir en 1954/60 el segundo como el *segundo de efemérides*, a saber, la fracción $1/31\,556\,925.9747$ del año trópico 1900 Enero 0 a las 12 horas tiempo de efemérides (ET). El tiempo de efemérides es un tiempo uniforme; es el tiempo newtoniano de la dinámica no-relativista.
3. El segundo de efemérides dio paso al *segundo SI* de tiempo atómico en 1967, definido como la duración de $9\,192\,631\,770$ periodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de ^{133}Cs , en reposo a una temperatura de 0 K. Con esta definición, este nuevo segundo coincidía con el segundo de efemérides (determinado a través del estudio del movimiento de la Luna) con precisión de 1 parte en 10^{10} .

2. Primeros relojes mecánicos

Hubo que esperar a los siglos XIV-XV para mejorar esencialmente la relojería, acudiendo a sistemas periódicos de pequeño tamaño y de naturaleza mecánica. La fuente de energía de los relojes mecánicos era un peso que pendía de una cuerda enrollada alrededor de un cilindro; este estaba acoplado a una rueda con dientes de sierra (rueda corona), y un mecanismo, llamado de *escape de verga* (eje vertical) con *foliot* (balancín en forma de barra transversal), que, auxiliado de dos paletas, iba liberando pausadamente, diente a diente, en cada oscilación del balancín, la caída del peso, que iba así bajando a velocidad media casi constante. Unos pesos colgantes del foliot permitían regular su periodo de vaivén. Este mecanismo se usó hasta el siglo XVI, con una incertidumbre o inexactitud de 1-2 horas al día (en el siglo XIV) hasta 15 minutos (siglo XVI), esto es $\Delta T/T \approx 1\%$. La calidad del reloj dependía de la pericia del relojero.⁸

3. Relojes de péndulo

Se produce un salto cualitativo de casi dos órdenes de magnitud con la introducción del péndulo, un mecanismo físico repetitivo, que siempre bate al mismo ritmo, para una misma longitud y lugar, y con independencia del peso y material de su lenteja, cuando las oscilaciones son pequeñas. Esto lo aprendimos de Galileo, quien, se cuenta, lo descubrió, siendo estudiante, mientras asistía a Misa en la catedral de Pisa, y tomando sus propios latidos como unidad de tiempo. Este isocronismo sugería que el reloj sería mucho más regular si se sustituía el foliot por un péndulo. Galileo concibió la idea del reloj de péndulo en 1637, pero no le dio tiempo a desarrollarlo (murió en 1642), encargándose de ello parcialmente su hijo, quien tampoco pudo concluir la tarea (falleció en 1649).

Huygens, que conocía bien los escritos de Galileo sobre el péndulo, construyó en 1656 el primer reloj de péndulo, que patenta en 1657 y encarga de su producción y venta al relojero Salomón Coster. El reloj de péndulo de Huygens limita su inexactitud a unos 15 s/día. Pero el escape de verga requería amplitudes rayanas en los 100° , demasiado grandes como para garantizar el isocronismo; se remedió con otros tipos de escapes, como los de áncora o los de reposo, que permitían amplitudes mucho más pequeñas, de unos 4° - 6° .

Subsistía un problema. Con los cambios de temperatura, la longitud del péndulo variaba y con ello su frecuencia. Se idearon relojes de péndulo con lentejas rellenas parcialmente de mercurio, líquido éste que al dilatarse por el calor elevaba el centro de masas, compensando así el alargamiento de la varilla, o relojes con varillas compuestas por materiales de diferentes coeficientes de expansión térmica. De este modo se consiguieron inexactitudes fraccionarias del orden de segundos por semana.

Se debe a Hooke, y luego a Huygens, el invento del volante, que permitió sustituir un largo péndulo por una pequeña rueda provista de un muelle en espiral, facilitando así los relojes portátiles.

⁸ G.J. Whitrow: TIME IN HISTORY: VIEWS OF TIME FROM PREHISTORY TO PRESENT DAY, Oxford Univ. Press 1989. Ver también Wikipedia: *Verge Escapement*.



Figura 6. Reloj (maestro y esclavo) de Shortt #20.

John Harrison (1693-1776) obtuvo los mejores cronómetros, ganando el premio de 20 000 libras (equivalentes a unos 3 millones de libras, o 5 millones de dólares, hoy) ofrecidas por el Parlamento Inglés a quien lograra construir un reloj que permitiese estimar la longitud en el mar con error menor de 30 minutos de arco.⁹ Consiguió, con su cronómetro H4, que tras un viaje de 81 días el reloj sufriese solo un retraso de 5 s (inexactitud fraccionaria 7×10^{-7}).

En 1921 Shortt empezó a construir relojes de péndulo muy sofisticados, consistentes en un par de péndulos en cajas separadas: un péndulo maestro, oscilando en vacío, encargado únicamente de marcar la

frecuencia del sistema, y un péndulo esclavo, auxiliar, que suministra al maestro la energía de mantenimiento, recibe de aquél señales eléctricas que le permiten corregir su posible falta de sincronía respecto del anterior, y es el encargado de mover las agujas y marcar la hora. De esto modo Shortt logró el mejor reloj electromecánico jamás construido (el “reloj perfecto”, fue llamado por sus artífices) con inexactitud menor de 1 s/año (3×10^{-8}),¹⁰ y cuya exactitud y estabilidad permitieron por vez primera detectar que la velocidad angular de la Tierra en su rotación sobre sí misma no es uniforme, sino que experimenta pequeñas variaciones estacionales.¹¹ Durante una década los relojes de Shortt ostentaron la primacía en exactitud y estabilidad, hasta la llegada de los relojes basados en osciladores naturales como los cristales de cuarzo.¹²

C. Cristal, moléculas, átomos y quanta

Son tres los componentes básicos de un reloj estándar: 1/ resonador (un movimiento periódico), 2/ una fuente de energía que mantenga esas oscilaciones, y 3/ un sistema que permita contar las oscilaciones y mostrar el conteo. El par 1+2 se llama oscilador del reloj.¹³

El resonador es tanto mejor cuanto menor es su amortiguamiento. Esto se mide mediante su *factor Q*, o *factor de calidad*, definido básicamente como la energía del oscilador dividida por la energía que pierde en cada ciclo; o mejor como $\nu_0/\Delta\nu$, donde ν_0 es la frecuencia central del oscilador, y $\Delta\nu$ su anchura en frecuencias. Cuando $Q \gg 1$, Q viene a ser el número de oscilaciones que realiza antes de que su energía se reduzca a un 0.2% de la inicial.

⁹ D. Sobel: LONGITUDE, Penguin 1996.

¹⁰ Y tal vez menor de 200 μ s/día; P.H. Boucheron, *Just How Good Was the Shortt Clock?*, Bulletin of the National Association of Watch and Clock Collectors (NAWCC) 27 (2-235), 165-173 (1985).

¹¹ A. Jones: SPLITTING THE SECOND: THE STORY OF ATOMIC TIME, Taylor & Francis 2000.

¹² Resonadores acústicos, como el diapasón, también tuvieron su oportunidad en el mundo de los relojes. Muchos recuerdan aún el Bulova Accutron, primer reloj electrónico, que apareció en 1960, y estaba dotado de un diapasón de 360 Hz de frecuencia como oscilador primario, eléctricamente excitado. Con una inexactitud de 2 s/día, aventajaba notablemente en exactitud a los relojes de pulsera de aquella época, basados en la rueda de balance (frecuencia de oscilación 5 Hz), y por sus cualidades fue elegido como reloj de los primeros astronautas. Pero todo tiene su tiempo, y pronto el diapasón hubo de dejar paso a mejores contendientes, los cristales de cuarzo como osciladores básicos para los relojes a escala comercial, mucho más baratos y con mejores prestaciones. Y por eso la firma suiza Bulova hubo de abrir paso en el mercado a la firma japonesa Seiko.

¹³ J. Jespersen, J. Fitz-Randolph: FROM SUNDIALS TO ATOMIC CLOCKS, Natl. Inst. Stand. Technol. Monogr. 155, 1999 Ed., 304 pages (Mar. 1999); M.A. Lombardi, Th.P. Heavner, S.R. Jefferts: *NIST Primary Frequency Standards and the Realization of the SI Second*, Measure 2, 74-89 (2007).

Interesa que Q sea muy grande, para tener una buena exactitud y estabilidad: un resonador de alto Q oscilará muy preferiblemente a su frecuencia central, y por tanto será muy exacto, y por otro lado será muy reducido el rango de frecuencias en torno a la central a las que podrá desviarse, por lo que será muy estable. La *inexactitud fraccionaria* I de un reloj se define como el error relativo que puede cometer en su medida del tiempo: $I := \Delta T/T$, donde T es el lapso de tiempo medido, y ΔT el error con que el reloj lo estima. Por ejemplo, para un reloj que retrasa (o adelanta) un cuarto de hora a la semana $I = 1.5 \times 10^{-3}$. Es evidente que cuanto menor sea I mayor será la exactitud del reloj. La estabilidad es también muy importante, pues su fallo resta significación a la comparación de medidas de duraciones de sucesos separados en el tiempo. Un reloj es tanto más estable a lo largo un lapso especificado de tiempo τ cuanto menos varía su frecuencia durante el mismo; un índice estadístico muy útil de esa estabilidad a corto plazo ($\tau \sim 1-10^3$ s) es la llamada *desviación de Allan* $\sigma_y(\tau)$.¹⁴ Por ejemplo, si para un cierto oscilador de cuarzo $\sigma_y(1 \text{ s}) = 3 \times 10^{-10}$, la diferencia de frecuencias al cabo de 1 segundo tiene un valor relativo cuya media cuadrática es 3×10^{-10} .

Para los relojes de pulsera con rueda de balance $Q \sim 100-300$, para relojes de diapason $Q \sim 2000$, y un buen reloj de péndulo llega a $Q \sim 10^4-10^5$. Sus inexactitudes fraccionarias pueden estimarse en $I \sim 10^{-2}$, $I \sim 6 \times 10^{-6}$, e $I \sim 3 \times 10^{-8}$, respectivamente.

1. Relojes de cuarzo

En 1927 se inventó el reloj de cuarzo. El cristal de cuarzo (dióxido de silicio, material piezo-eléctrico) es un resonador cuya frecuencia depende de la pureza de la muestra, de su tallado y tamaño, y de la frecuencia de la corriente eléctrica que lo excita. Su Q puede variar desde 10^5 hasta 2×10^6 . Generalmente se talla en forma de pequeño diapason (de tamaño milimétrico), para que oscile exactamente a 2^{15} Hz, esto es, 32 768 Hz, a la temperatura de 25° C. Con esto se consigue que, por divisiones digitales sucesivas por dos, se con-

sigan frecuencias de 1 Hz que son las que guían el avance de las agujas del segundero. Cuatro décadas tardaron en comercializarse, tras el desarrollo de la lógica digital basada en semiconductores. Seiko fue, como ya anticipamos, la conocida marca de explotación. La incertidumbre de estos relojes está en 6×10^{-6} (1/2 s al día) a la temperatura de 31° C. Los mejores relojes de cuarzo tienen una incertidumbre de 1 ms/mes.

La siguiente etapa fue echar mano de resonadores que nos brinda la naturaleza, como moléculas y átomos. No solo se conseguían así factores Q mucho más altos (al menos en dos órdenes de magnitud), sino que con ellos no hay que preocuparse de tallados de cristales, ni de longitudes de péndulos, ni de efectos de la temperatura, ni de la fricción. Ahora la naturaleza nos ofrece unos patrones invariables, para los que esos efectos o no existen, o son muy pequeños. Primero se usaron moléculas, concretamente, la de amoníaco (1948/49). Entre sus muchos niveles, hay dos, el fundamental (par bajo inversión del N) y un primer excitado (impar), separados en 23 870 MHz (región de microondas); esta se toma como frecuencia del resonador. Para excitarlo se echa mano de un oscilador apropiado de cuarzo. Se consigue un Q del orden de 10^8 , y una exactitud de 2×10^{-8} , peor que la conseguida con los relojes de cuarzo adoptados como estándares nacionales primarios en aquella época.

2. Relojes atómicos

Para conseguir mejoras más importantes, fue preciso echar mano de los átomos como resonadores. Se han considerado fundamentalmente tres clases de átomos: hidrógeno (reloj de máser de H, frecuencia de transición hiperfina 1 420 405 751.786 Hz), ¹³³Cs (reloj atómico de Cesio, frecuencia transición hiperfina 9 192 631 770 Hz), y ⁸⁷Rb (reloj atómico de Rubidio, frecuencia transición hiperfina 6 834 682 610.904 324 Hz). Cada uno tiene sus ventajas y sus inconvenientes: el de hidrógeno, es muy complejo y muy caro, llega a $Q \sim 10^9$, destaca por su gran estabilidad en cortos tiempos (unos días), y como reloj tiene

¹⁴ D.W. Allan, *Time and Frequency (Time-Domain) Characterization, Estimation, and Prediction of Precision Clocks and Oscillators*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. UFFC-34, no. 6, 647-654 (1987). D.B. Sullivan, D.W. Allan, D.A. Howe, F.L. Walls, eds., *Characterization of Clocks and Oscillators*, NIST Tech. Note 1337 (Mar. 1990).

una inexactitud fraccionaria de 1 s en 63 Ma (5×10^{-16}); el de Cesio, es muy exacto y estable, y es por ello reloj estándar primario; el de Rubidio, es barato, de tamaño reducido, pero algo menos preciso que los anteriores (aunque puede llegar a superarlos).

Nos reduciremos a algunas consideraciones más detalladas sobre los relojes atómicos de Cs.¹⁵

a. Relojes de Cesio tipo haz El átomo $^{133}_{55}\text{Cs}$ tiene dos niveles hiperfinos, separados en 9 192 631 770 Hz (zona de microondas). Proceden estos niveles del acoplo del espín del electrón externo 6s, con el espín nuclear 7/2, dando por tanto dos estados hiperfinos: $F=3$ (fundamental, espines antiparalelos), $F=4$ (excitado, espines paralelos).

Un horno eléctrico calienta Cs, liberándolo en forma de un haz de átomos que entran en un tubo de vacío. Un campo magnético divide este haz en dos, dejando pasar los $F=3$, y deflectando los $F=4$. Los que siguen se ven sometidos a un oscilador de radioondas de frecuencia muy próxima a 9 192 631 770 Hz, de modo que los átomos absorben estas ondas excitándose al $F=4$. Al final del tubo otro campo magnético separa los que no se han excitado, y los excitados van a un detector. Este detector genera una señal proporcional al número de átomos que recibe, señal que retroalimenta al oscilador, haciendo que este varíe su frecuencia para mejorar la señal recibida. Así se consigue que la frecuencia del oscilador y de la transición hiperfina se igualen produciendo el acoplo resonante del oscilador con la haz de Cesio. Se logran de este modo factores Q del orden de 10^8 .

En NBS (NIST desde 1988) se empezó a trabajar sobre estos relojes en 1952, aunque hasta 1959 no se adoptaron como estándar primario nacional de frecuencias (NPFS) en USA. Ya antes lo habían hecho los ingleses (1955). El NBS-1 estuvo operativo como estándar primario hasta 1960, y la mejor exactitud publicada para este reloj fue 1×10^{-11} . El último de la saga fue el NBS-7, empezado a desarrollar en 1988, y operativo como NPFS entre 1993 y 1998, alcanzándose con él la exactitud de 5×10^{-15} .

Para mejorar esto, se hacía preciso idear algo que diera más tiempo para “interrogar” a los átomos (es

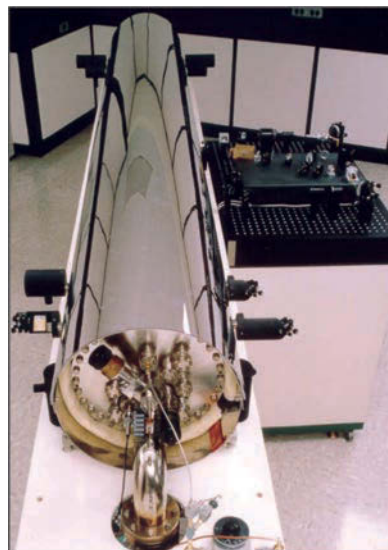


Figura 7. Reloj de Cs NBS-7.

decir, interaccionar con ellos para conocer o actuar sobre su estado). En los relojes de haz de Cs, este tiempo está limitado a unos 10 ms, que es lo que tardan los átomos en recorrer el tubo.

b. Relojes de Cesio tipo fuente Los relojes de Cs tipo fuente, como el NIST-F1, resuelven brillantemente este problema, echando mano del enfriamiento por láser. Tres pares de láseres ortogonalmente dispuestos, y contrapuestos por pares, se utilizan para enfriar un colectivo de átomos de Cs, produciendo una melaza óptica que los frena. Trabajan a frecuencia ligeramente inferior a la de resonancia hiperfina, de modo que solo absorben su radiación los átomos que se mueven hacia la fuente láser emisora del fotón, frenándose en el proceso. Los átomos se desexcitan emitiendo un fotón en dirección aleatoria y de mayor energía que el que absorbieron, con lo que pierden energía. Este proceso se repite unas 10^7 veces por segundo. Así se consigue enfriar el colectivo a 1 μK en pocos centenares de milisegundo. Se forma una bola de unos 10^8 átomos, con velocidades de 1 cm/s (en lugar de 100 m/s que tenían antes).

Estos son los pasos del proceso:

1. Se logra esta bola de aproximadamente 1 cm³ de volumen y unos 10^8 átomos, enfriados a 0.5 μK , en la intersección de los tres haces cruzados.

¹⁵ M.A. Lombardi *et al.*, *loc. cit.*

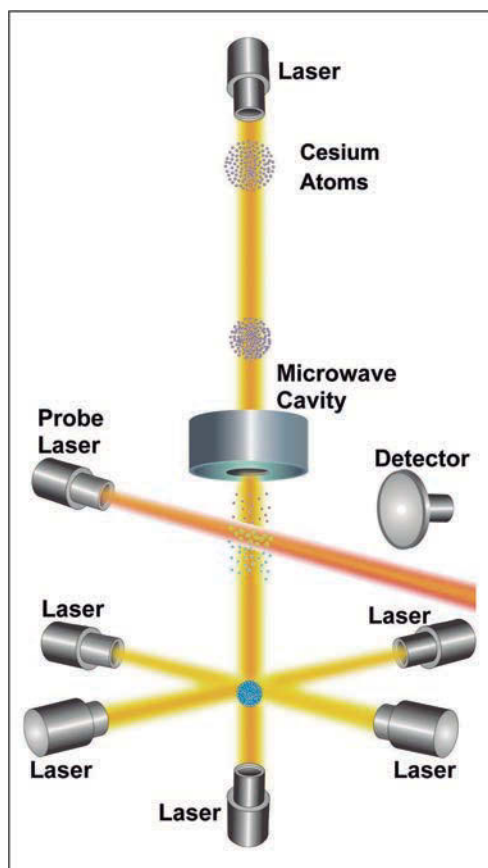


Figura 8. Reloj de Cs tipo fuente NIST-F1.

2. Desintonizando convenientemente las frecuencias de los láseres que lanzan hacia arriba y hacia abajo, se consigue enviar la bola a una velocidad inicial de 4 m/s hacia arriba.
3. Los láseres se apantallan, de forma que ese ascenso prosigue en vuelo libre.
4. Los átomos en la bola están fundamentalmente en el estado $F=4$, distribuidos por igual entre los diversos valores de la tercera componente m_F del momento angular \mathbf{F} . Un pulso de microondas adecuado lleva los átomos que se hallan en el estado $|4,0\rangle$ al estado $|3,0\rangle$, sin afectar a los demás. Mediante impulsos EM adecuados (ráfagas u ondas de choque EM) se quitan de esa bola todos los átomos que no estén en el estado $F=3$, $m_F=0$.
5. Los átomos restantes, en estado $|3,0\rangle$, cruzan en su ascenso, a una velocidad de unos 3 cm/s, una

cavidad de microondas, donde sufren una primer interrogatorio, tendente a propiciar su excitación $|3,0\rangle \rightarrow |4,0\rangle$.

6. Tras salir de esa cavidad, ascienden en el campo gravitatorio una distancia de 1 m aproximadamente, e inician la caída, atravesando de nuevo la cavidad, donde sufren un nuevo interrogatorio. En subir más bajar vienen a tardar 1 s. Como se mueven muy despacio, el tiempo de interrogatorio es mucho mayor que en los relojes de haz de Cs.
7. Tras los dos interrogatorios sufridos, hay muchos átomos que han cambiado de estado (pasando de $F=3$ a $F=4$). Tras salir los átomos en su descenso de la cavidad de microondas, un haz láser, que los ilumina, sintonizado a la transición óptica $F=4 \rightarrow F'=5$, produce una señal de fluorescencia, que recibe un detector.¹⁶ Este transmite la información y un sistema de retroalimentación, como siempre, fuerza a que la señal de fluorescencia sea cada vez mayor, hasta la sintonización total de la frecuencia de la cavidad de microondas con la frecuencia de transición hiperfina.

El factor de calidad Q y la incertidumbre fraccionaria de este reloj son 10^{10} y 3×10^{-16} (1 s en 100 millones de años), respectivamente.

Con el fin de disminuir los efectos de desplazamiento de frecuencia por la radiación de cuerpo negro y por densidad, se está desarrollando el reloj atómico de Cesio tipo fuente NIST-F2, en que esos efectos se hacen ignorable el primero, y menor el segundo, y se mejora la exactitud del reloj, llevándola a 1×10^{-16} , esto es, a unos 10 ps/día.

c. Relojes ópticos Los relojes atómicos trabajan en las frecuencias de las microondas (10 GHz). Los ópticos, en las frecuencias del visible, en los PHz. Como la estabilidad y exactitud de un reloj crecen al aumentar su frecuencia y disminuir la anchura de la transición EM, los relojes ópticos deben ser mucho más estables y exactos que los atómicos. Incluso pueden llevar a la redefinición del segundo. Presentan un nuevo problema, que es la medida de las oscila-

¹⁶ El estado $F'=5$ es un estado hiperfino del nivel excitado $6^2P_{3/2}$ del Cs.

ciones. Ya la electrónica habitual no sirve. Se echa mano de los peines de femtosegundos, que permiten comparar frecuencias ópticas al nivel de 1 parte en 10^{15} .

Se ha experimentado hasta la fecha con relojes formados por un solo ión, llamado “ión reloj”, atrapado en una trampa EM, como $^{199}\text{Hg}^+$, $^{27}\text{Al}^+$, $^{171}\text{Yb}^+$. El primero tiene una transición $E2$ entre dos niveles S y D separados en 282 nm (1.064 PHz, anchura de línea 2 Hz); el segundo presenta una transición entre dos niveles S y P separados en 1.121 PHz (267 nm), anchura natural de línea 8 mHz; y el tercero tiene una transición $E3$ entre niveles S y F, separados en 0.518 PHz (579 nm), anchura de línea 1 Hz. Son por tanto transiciones muy poco frecuentes, lo que les presta una estabilidad y exactitud extraordinarias.

En el caso del ión $^{27}\text{Al}^+$, el enfriamiento por láser y la determinación del estado cuántico del ión no es posible de forma directa, por carecer este ión de transiciones que posibiliten dicho enfriamiento y el conocimiento de su estado interno; la brillante idea es acompañarlo, en la misma trampa, de otro ión ($^9\text{Be}^+$, o $^{25}\text{Mg}^+$), llamado “ión lógico”, entrelazado con él, a unos 4 micras, que permite su enfriamiento por láser, arrastrando con ello el enfriamiento del ión reloj, y también la determinación del estado, a través de la determinación del estado del ión lógico, y el uso de la lógica cuántica familiar de la teoría cuántica de la computación. De ahí el nombre de reloj óptico lógico, o reloj de lógica cuántica.

En la actualidad, el reloj cuántico del ión de Aluminio con ión lógico de Magnesio es el más exacto del mundo, con una inexactitud fraccionaria de 8.6×10^{-18} , es decir, de 1 s en 3.8×10^9 años, equivalente a medir la distancia Sol-Tierra con error de 1 μm .

d. Relojes nucleares En marzo del 2012 se anunciaba una propuesta de desarrollo de un reloj nuclear, capaz de una exactitud de 1×10^{-19} . Se basa en el ión del Torio $^{229}\text{Th}^{3+}$. Este ión tiene un estado fundamental electrónico $^5\text{F}_{5/2}$, y entre su variedad isomérica, hay un isómero ^{229}mTh con estado fundamental electrónico también $^5\text{F}_{5/2}$, separado en energía del anterior por 7.6 eV, equivalente a 163 nm, o 1.8 PHz. En cuanto al núcleo, el del ^{229}Th tiene un estado fundamental $5/2^+$, mientras que el estado fundamental del ^{229}mTh es un

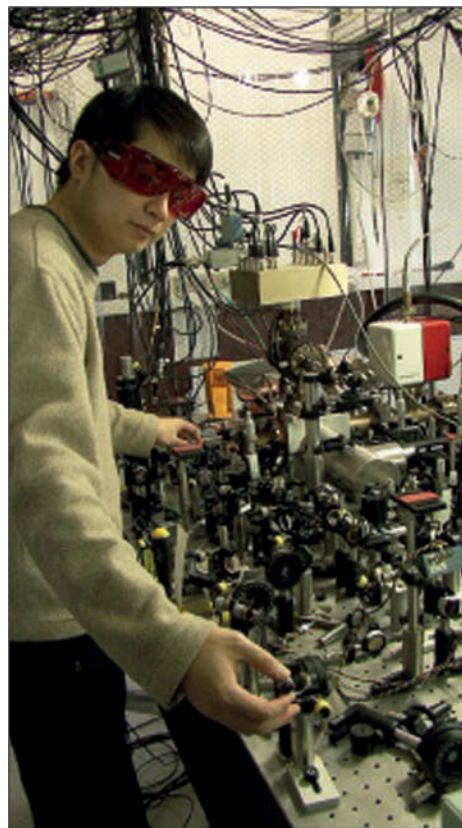


Figura 8. Reloj de lógica cuántica con ión de Al (NIST).

$3/2^+$. Los estados hiperfinos son, por tanto, para el ^{229}Th , estos: $F=0, 1, 2, 3, 4, 5$, y para el ^{229}mTh , $F=1, 2, 3, 4$. De ellos, los estados “estirados” ($F=5, m_F=\pm 5$), y ($F=4, m_F=\pm 4$), son los menos sensibles a los campos externos, y tomados como reloj (transiciones $|5,5\rangle \leftrightarrow |4,4\rangle$, $|5,-5\rangle \leftrightarrow |4,-4\rangle$), tienen una anchura de línea de a lo sumo 100 μHz . Esta es la propuesta para un reloj de exactitud 1×10^{-19} , esto es, 0.05 s en 14×10^9 años (edad del Universo), equivalente a medir la distancia Sol-Tierra con error del orden de 15 nm.

A diferencia de los relojes atómicos, en que los agentes principales son los electrones, en estos relojes nucleares el agente principal es un neutrón oscilante del núcleo (responsable de “conectar” los dos isómeros involucrados); el neutrón es mucho más masivo que el electrón, y orbita en el núcleo, por lo que está bastante más protegido por éste de la acción de campos perturbadores externos, lo que hace posible esta mejora en precisión de casi dos órdenes de magnitud. Las dificultades tecnológicas son, sin embargo, muy grandes, aunque no insuperables. Una de ellas es que no se conoce la frecuencia exacta de oscilación de este

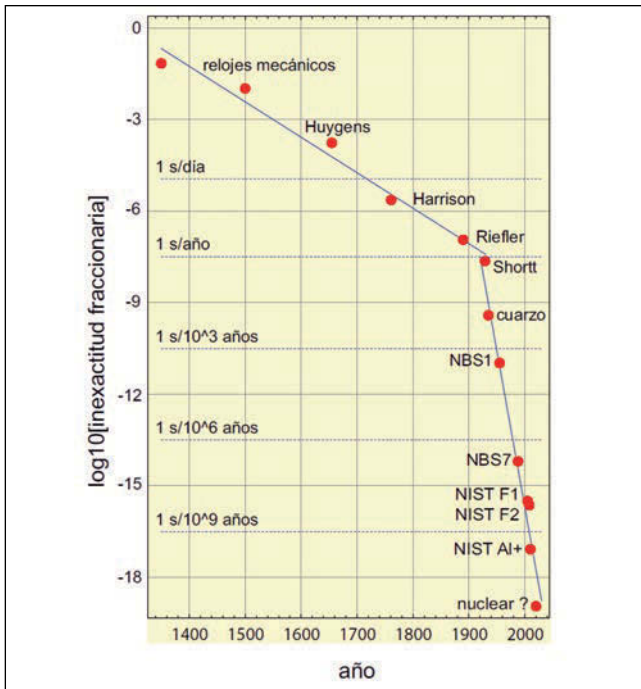


Figura 10. Variación en el tiempo del logaritmo en base 10 de la inexactitud fraccionaria de los relojes.

reloj, y por tanto con qué frecuencia láser (del orden de PHz) hará falta iluminarlo para excitar el reloj. Los cálculos (con física nuclear) que es preciso hacer son aún poco precisos.

D. Evolución en el tiempo de la inexactitud fraccionaria

Desde los primeros relojes mecánicos a nuestros días, la inexactitud fraccionaria ha disminuido con dos claros ritmos exponenciales, como muestra el gráfico adjunto.

Entre 1350 y 1920 disminuye a razón de un orden de magnitud por siglo, mientras que desde 1920 hasta el presente ese ritmo pasa a ser mucho más rápido, a saber, un orden de magnitud cada 10 años.

III. APLICACIONES

Como botones de muestra de la potencialidad de estos fantásticos relojes, citaremos la exquisita sensibi-

lidad de estos instrumentos a pequeños cambios en el campo gravitatorio, su aplicación a la búsqueda de variaciones en el tiempo de las constantes fundamentales, y la medida más precisa jamás realizada en física hasta el momento.

A. Desplazamiento gravitacional de la frecuencia

Es bien sabida la dilatación que el campo gravitatorio ejerce sobre el tiempo: la frecuencia de un reloj disminuye al aumentar la intensidad del campo gravitatorio. En campos de gravedad Φ poco intensos ($|\Phi|/c^2 \ll 1$), esa variación de frecuencia obedece a la relación

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} \approx \frac{\Delta\Phi}{c^2}. \quad (4)$$

Así, en un campo gravitatorio uniforme $\Phi(z) = gz$, como lo es el de la Tierra en una pequeña región exterior cercana a su superficie, siendo z la altura, el incremento fraccionario de la frecuencia de un reloj entre las cotas z , $z + \Delta z$ satisface

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} \approx \frac{g\Delta z}{c^2} \approx (\Delta z/1.1\text{m}) \times 10^{-16}. \quad (5)$$

Con dos relojes ópticos de ión de Al en laboratorios próximos, conectados por fibra óptica para su comparación, y auxiliados, respectivamente, por $^9\text{Be}^+$ y $^{25}\text{Mg}^+$ como iones lógicos, se midió su diferencia fraccionaria de frecuencias cuando, primero, el reloj de Mg-Al se colocaba 17 cm más bajo que el de Be-Hg, y, luego, cuando se subía 33 cm más alto de lo que antes inicialmente estaba, con el resultado de que la frecuencia del reloj de Mg-Al había cambiado en $\Delta\nu/\nu \approx (4.1 \pm 1.6) \times 10^{-17}$; transformado este resultado en cotas de altura con la fórmula anterior, equivale a un desplazamiento vertical de 37 ± 15 cm, a comparar con el valor de 33 cm.¹⁷

Según los autores de este experimento, cuando la exactitud de los relojes atómicos alcance 10^{-18} o mejor, cuando se pueda disponer de una amplia red mundial de ellos y se perfeccione su intercomunicación para poder comparar frecuencias entre lugares muy dis-

¹⁷ C.W. Chou et al.: *Clocks and Relativity*, Science **329**, 1630-1633 (2010).

tantes, sus aplicaciones en geodesia, hidrología y en física fundamental serán numerosas y muy importantes.

B. Medición de un cociente de frecuencias con 17 cifras significativas

La tecnología disponible desde hace unos años en el funcionamiento y control de los relojes ópticos de un ión ha hecho posible medir un cociente de frecuencias con la fabulosa precisión de 5.2×10^{-17} , que supera en un orden de magnitud la precisión con que realiza actualmente el segundo internacional (3.3×10^{-16});¹⁸ esta imprecisión en el segundo no interviene en el cociente de las frecuencias. Concretamente, se ha obtenido el siguiente resultado experimental:¹⁹

$$\frac{\nu_{\text{Al}^+}}{\nu_{\text{Hg}^+}} = 1.052\,871\,833\,148\,990\,438(55), \quad (6)$$

donde ν_{Al^+} , ν_{Hg^+} son las frecuencias de los relojes ópticos basados en los iones $^{27}\text{Al}^+$, $^{199}\text{Hg}^+$, respectivamente, el primero auxiliado por el ión $^9\text{Be}^+$:²⁰

$$\begin{aligned} \nu_{\text{Al}^+} &= 1\,121\,015\,393\,207\,851(6) \text{ Hz}, \\ \nu_{\text{Hg}^+} &= 1\,064\,721\,609\,899\,145.30 \pm 0.69 \text{ Hz}. \end{aligned} \quad (7)$$

C. Variación temporal de las constantes fundamentales

Las frecuencias de transición ópticas son de la forma

$$\nu = \text{const.} \times (cR_\infty) F(\alpha),$$

donde la constante es un valor numérico que no depende de ninguna constante fundamental, y $F(\alpha)$ es una función de la constante α de estructura fina que proviene de las correcciones relativistas y complejos efectos de muchos cuerpos. Por tanto, en la comparación de frecuencias ópticas solo intervienen números y la constante α .

Del estudio a lo largo de unos meses del cociente $\nu_{\text{Al}^+}/\nu_{\text{Hg}^+}$ entre las frecuencias de dos relojes ópticos, uno de ión Al^+ y el otro de ión Hg^+ , se ha obtenido la siguiente cota experimental sobre una posible variación de α :²¹

$$\frac{\dot{\alpha}}{\alpha} = (-1.6 \pm 2.3) \times 10^{-17} / \text{año} \quad (8)$$

que es compatible con un valor nulo.

¹⁸ S.R. Jefferts, T.P. Heavner, T.E. Parker, J.H. Shirley: *NIST Cesium Fountains – Current Status and Future Prospects*, Proc. SPIE **6673**, 667309 (2007).

¹⁹ T. Rosenband, D.B. Hume et al.: *Frequency Ratio of Al^+ and Hg^+ Single-Ion Optical Clocks; Metrology at the 17th Decimal Place*, Science **319**, 1808-1812 (2008).

²⁰ T. Rosenband, P.O. Schmidt et al.: *Observation of the $^1S_0 \rightarrow ^3P_0$ Clock Transition in $^{27}\text{Al}^+$* , Phys. Rev. Lett. **98**, 220801 (2007); W. H. Oskay et al.: *Single-Atom Optical Clock with High Accuracy*, Phys. Rev. Lett. **97**, 020801 (2006); L. Lorini et al.: *Recent atomic clock comparisons at NIST*, Eur. Phys. J. Special Topics **163**, 19-35 (2008); J.E. Stalnaker et al.: *Optical-to-microwave frequency comparison with fractional uncertainty of 10^{-15}* , Appl. Phys. B **89**, 167-176 (2007).

²¹ T. Rosenband, D.B. Hume et al.: *loc. cit.*; L. Lorini et al.: *loc. cit.*