

Historia de la medición del tiempo: astronómico, físico, atómico, . . .

José M M Senovilla

UPV/EHU, Bilbao

Temas de Física, 2012

Contenido

- 1 Introducción
- 2 El tiempo de los astrónomos
- 3 El tiempo de los físicos
- 4 El tiempo atómico
- 5 El futuro

El segundo

Segundo

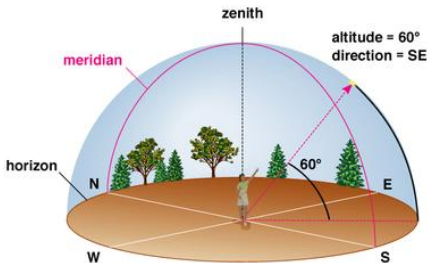
Un segundo es la duración de 9192631770 oscilaciones de la radiación emitida en la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del isótopo 133 del átomo de Cesio (^{133}Cs), a una temperatura de 0 K.

Pero, ¿cómo hemos llegado hasta aquí? ¿No era el segundo la 60ava parte del minuto, que era la 60ava parte de la hora, que es la 24ava parte de un día? Y el día está ligado a la rotación del Sol (o terrestre, si se prefiere).

¿Qué ha pasado?

El tiempo solar

- Durante toda la historia de la humanidad y hasta bien entrado el siglo XX el tiempo se ha medido siempre basándose en el movimiento aparente del Sol en el cielo.
- Se define el **cenit** como la dirección vertical y el **meridiano** (celeste) como el semi-círculo que va desde el punto más al Norte del horizonte hasta el punto más al Sur del mismo pasando por el cenit.



Copyright © Addison Wesley

Definición (Día)

*Se define el **día** como el intervalo de tiempo entre dos cruces consecutivos del Sol por el meridiano celeste.*

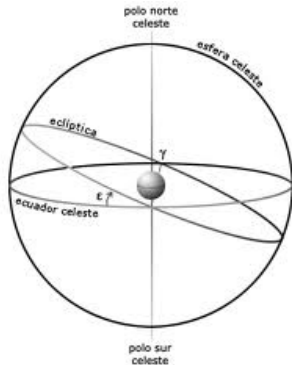
- Esto tiene la ventaja de no depender de la salida o puesta del Sol, ni de cuánto dura cada día concreto.
- De hecho, los días varían su duración entre 24 horas menos 22 segundos y 24 horas más 30 segundos. ¿Por qué?
- Recordemos que la trayectoria aparente del Sol por el cielo se denomina la **eclíptica**. Si pudiéramos ver a la vez las estrellas y el Sol notaríamos que éste se desplaza lentamente hacia el Este a lo largo de la eclíptica a razón de casi un grado por día (nótese: 360° frente a 365 días).

La eclíptica



La eclíptica

La eclíptica está inclinada respecto del Ecuador terrestre $23^{\circ}27'$, o si se quiere, el eje de rotación de la Tierra está inclinado ese ángulo con respecto al plano de la eclíptica, que es el plano de la órbita terrestre, claro está.



ϵ = oblicuidad de la eclíptica [$23^{\circ} 27'$]
 γ = punto gamma



La variación de los días

- La Tierra describe una órbita kepleriana elíptica alrededor del Sol, de manera que está unos 5 millones de Km más cerca del Sol en el perihelio (el 3(\pm 1) de Enero) que en el afelio (el 4(\pm 1) de Julio).
- Alrededor del perihelio la Tierra se mueve más deprisa en su órbita, lo que hace que el Sol tenga una velocidad aparente en la eclíptica de $1,019^\circ/\text{día}$ frente a $0,953^\circ/\text{día}$ en el afelio. Esto hace que los días sean más cortos en verano (boreal) que en invierno.
- Pero hay otro efecto debido a la inclinación del eje terrestre, que hace que el Sol se desplace hacia el Norte en primavera y hacia el Sur en otoño. Sólo en los solsticios el movimiento del Sol está orientado únicamente de Oeste a Este, en cualquier otro momento tiene una componente extra hacia el Sur o el Norte.

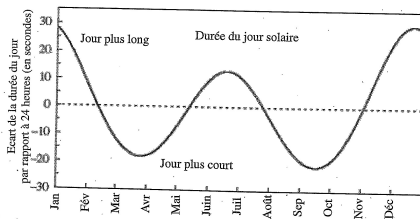
Solsticios



FIGURA 23
ECLIPTICA Y ECUADOR CELESTE, EQUINOCCIOS Y SOLSTICIOS

La variación de los días

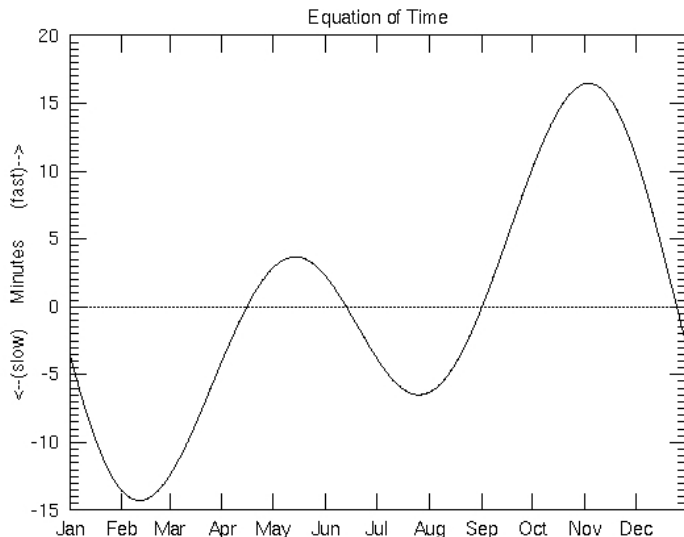
- Por lo anterior, excepto en los solsticios el Sol se desplaza ligeramente más despacio con respecto al meridiano celeste, lo que tiene efecto de alargar los días en los solsticios y acortarlos en los equinoccios.
- la combinación de los dos efectos produce una variación con periodicidad anual de la duración diaria como se muestra en la figura.



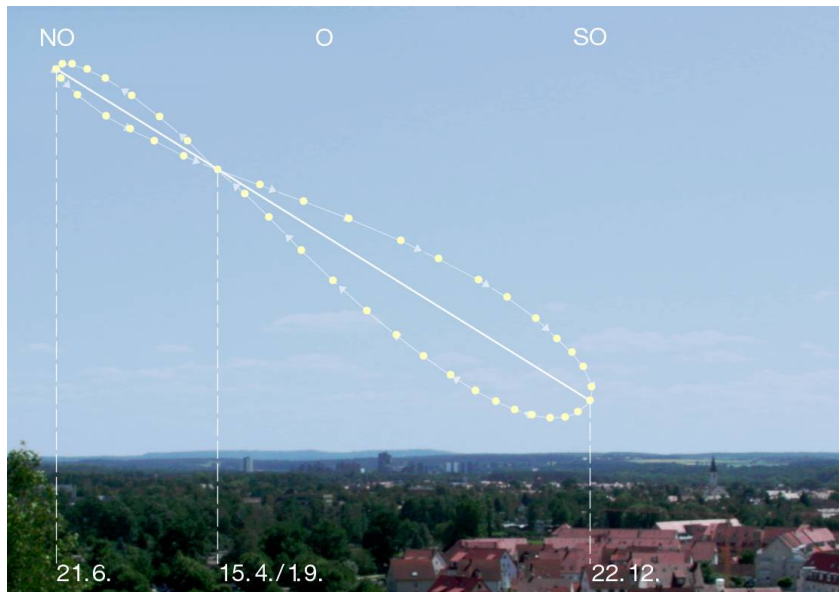
3. Comme l'orbite terrestre n'est pas circulaire, et comme l'axe de rotation terrestre est penché, la durée du jour solaire varie au long de l'année. Elle est plus longue d'une minute environ à la fin décembre qu'à la mi-septembre.

- Esto lleva a la definición de **tiempo solar medio**, que es un artificio matemático como si existiera un “sol medio” que recorre el Ecuador de manera regular. El día solar medio dura 86400 s (o sea, 24 horas). Ha sido la base de las medidas de tiempo hasta hace pocos decenios.
- El tiempo solar aparente (el indicado por el verdadero Sol) y el tiempo solar medio pueden llegar a diferir hasta en 16 minutos (allá por Noviembre) y la diferencia entre los dos se llama la ecuación de tiempo

La ecuación de tiempo



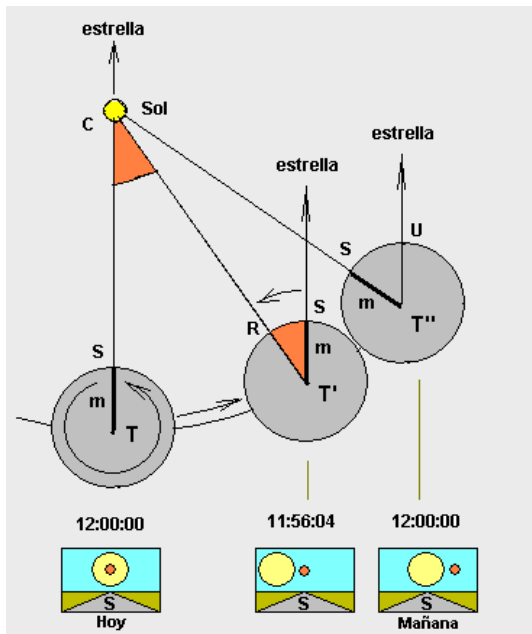
El Analema



El tiempo sidéreo (o sideral)

- Dado que el sol medio es una abstracción, y que el Sol real por una parte cubre $1/2^\circ$ en el cielo y por otra se desplaza en todo su diámetro en 120 s (2 minutos), los astrónomos no miden nunca el tiempo solar mediante el Sol.
- En la práctica lo que hacen es medir las estrellas. Dos cruces consecutivos de éstas por el meridiano celeste definen el **día sidéreo**.
- Hay que notar que el día sidéreo es ligeramente más corto que el día solar medio, en concreto dura 23h 56' 4". ¿Por qué?
- En todo caso, dado que el Sol se desplaza a velocidad constante con respecto a las estrellas, el día solar medio y el día sidéreo mantienen una diferencia fija lo que permite —midiendo el paso de las estrellas por el cenit, que da el tiempo sidéreo— calcular el tiempo solar medio mediante una simple corrección aritmética.

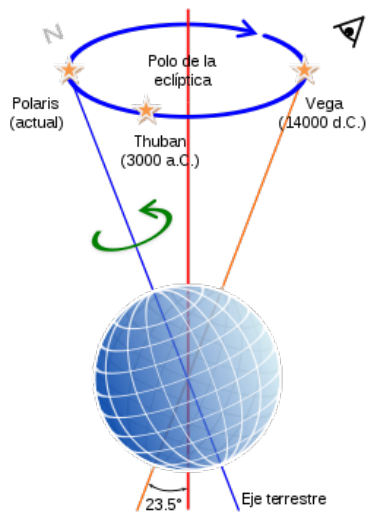
Tiempo sidéreo frente a tiempo solar medio



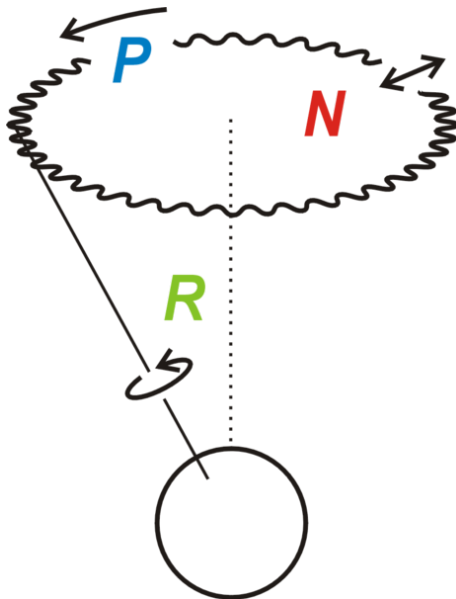
La Tierra está loca...

- Como se sabe, la Tierra no sólo posee un movimiento de rotación sobre su eje, sino que tiene además movimientos de precesión, nutación, etc.
- El eje de rotación terrestre describe un círculo en el cielo con un periodo aproximado de 25800 (± 100) años (el denominado “año platónico”). Mientras que actualmente el eje apunta hacia la estrella polar, hace 4500 años apuntaba hacia la estrella Thuban (en la constelación del Dragón) y dentro de 14000 años apuntará a la estrella Vega (en la Lira). Este movimiento da lugar a la llamada **precesión de los equinoccios**.
- Aparte lo anterior, la Tierra sufre una ligera oscilación llamada **nutación**. Esto sucede con cualquier cuerpo girando sobre su eje (para una peonza, por ejemplo, cuando cae comienza la precesión y en consecuencia su punta se apoya en el suelo con más fuerza hasta que la reacción vertical llega a ser mayor que el peso, haciendo que el centro de masas se acelere hacia arriba).

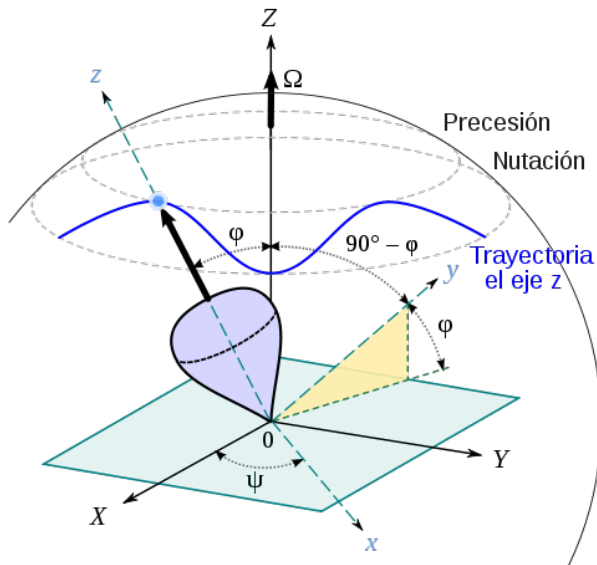
Precesión



Rotación, Precesión y Nutación



Precesión y Nutación



Ambos movimientos, de precesión y nutación, son debidos a la influencia del Sol y la Luna sobre la Tierra, deformándola e influyendo en su movimiento intrínseco.

No obstante, estos movimientos son predecibles y por lo tanto controlables.

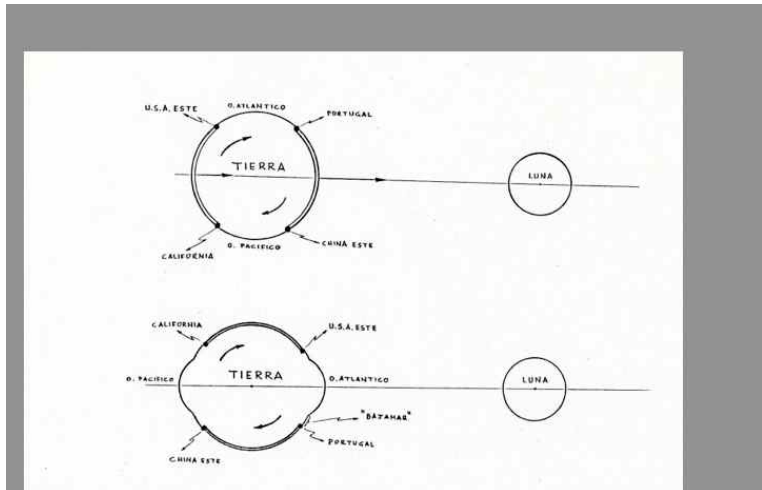
Pero es que hay más....

¿Se acelera la Luna?

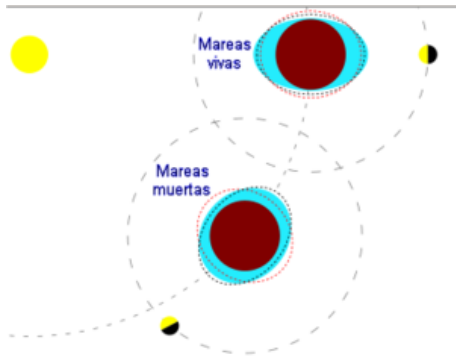
- E. Halley se percató, allá por 1695, de que los registros de los antiguos eclipses y la posición en ellos de la Luna no concordaba con los datos modernos (de su época). Era necesario que la Luna girase en su órbita terrestre más deprisa hoy que antaño.
- En 1749 R. Dunthorne confirmó el resultado y dedujo que el avance inexplicado de la Luna era de casi 2° en unos 2400 años.
- P.S. Laplace propuso una solución en 1787 basada en la perturbación debida a la atracción que ejercen los demás planetas. No obstante, J.C. Adams rehizo el cálculo en 1853 y comprobó que sólo podía dar cuenta de la mitad del valor observado.
- A partir de 1860 los astrónomos empezaron a darse cuenta de que esta "aceleración" podía explicarse por una lentificación de la rotación terrestre.

¿Se acelera la Luna o se ralentiza la Tierra?

¿Cuál puede ser la causa de este enlentecimiento de la rotación terrestre? La respuesta la dieron independientemente W. Ferrel y C.-E. Delaunay: **las mareas**.



Mareas

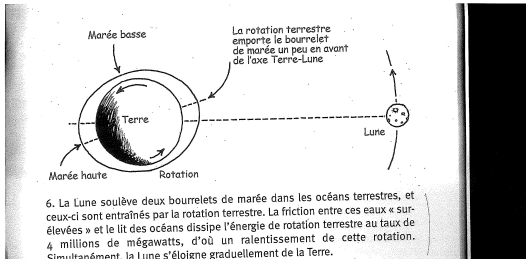


Mareas (esquema)



Un efecto de las mareas

- Como se sabe, las mareas se forman al tener el agua mayor facilidad de deformación que la corteza terrestre. Ello hace que se formen dos “michelines”, de una altura media de cerca de 50 cm, uno dando la cara a la Luna el otro en el lado opuesto. Durante este tiempo la corteza sólida gira por debajo de estos michelines (por lo que vemos subir y bajar las aguas en la costa cada 6 horas más o menos).
- La Tierra gira sobre sí misma más rápidamente que la Luna lo hace en torno a aquella. Por esta causa, los michelines son arrastrados por la rotación terrestre un poco hacia adelante:



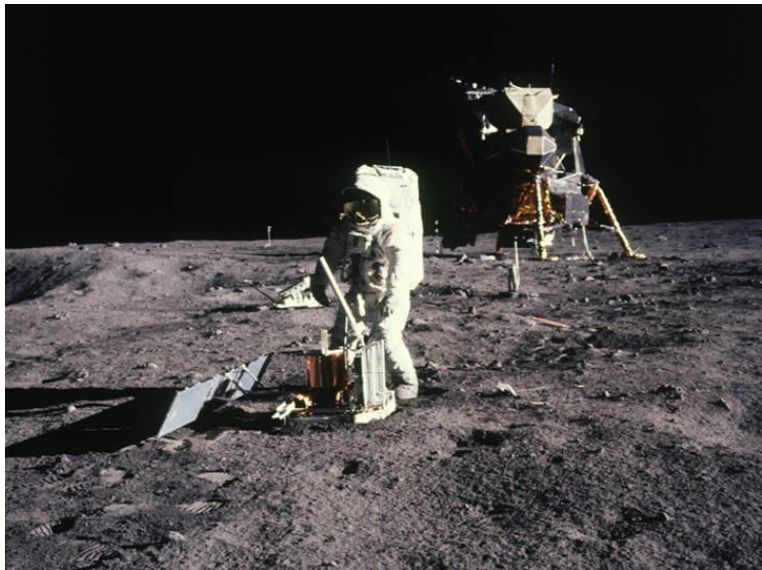
Un efecto de las mareas

- Lo anterior provoca una fricción entre las aguas oceánicas y los fondos marinos, en especial en aguas poco profundas (cerca de las placas continentales).
- Ferrel y Delaunay probaron que el calor disipado por esta fricción —alrededor de unos 4×10^6 MW— conlleva un enlentecimiento leve, pero medible, de la rotación terrestre.
- Esto implica, claro está, que los días se alargan...
- En consecuencia, el día solar medio no puede considerarse de duración constante. Se alarga, y con él, las horas, los minutos y los segundos.
- En resumidas cuentas, la Tierra deja de ser un buen reloj, un buen patrón de medida del tiempo.

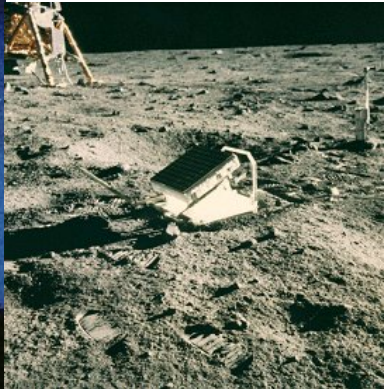
¿Conservación del momento cinético?

- La ralentización de la rotación terrestre implica un claro descenso de su momento angular. Pero éste se conserva, así que, ¿a dónde va a parar esa pérdida?
- Naturalmente, a la Luna. Por lo tanto, el momento angular de ésta aumenta. ¿Gira más rápidamente? ¡No!
- En realidad, lo que se produce es un alejamiento progresivo de la Luna, a razón de unos 3,8 cm/año. Así, en realidad, la ralentización de la Tierra está acompañada de una desaceleración del movimiento orbital de la Luna. Por ello, al final la aceleración aparente del movimiento lunar no es tal, y lo que ocurre es que los días solares medios son inservibles al llegar a estas precisiones.

¿Cómo se mide la distancia a la Luna?



¿Cómo se mide la distancia a la Luna?



¿Cómo se mide la distancia a la Luna?

- Los **retro-reflectores** fueron dejados en la Luna por el Apollo XI (1969), Luna 17 (1970), Apollo XIV (1971), Apollo XV (1971) y Luna 21 (1973). (El de Luna 17 está hoy inaccesible).
- Se trata de medir con la mayor precisión posible el tiempo de ida y vuelta de un haz láser que se refleja en los retro-reflectores. Este tiempo es de aproximadamente 2,6 s.
- Estos experimentos presentan dificultades técnicas enormes. Para empezar, un haz bien focalizado de láser llega a la Luna con una apertura de 7 Km de diámetro. La fracción del haz que llega al reflector es, por ello, aproximadamente una milmillonésima (10^{-9}).
- El haz reflejado sufre una apertura aún mayor y llega a la Tierra con un diámetro de 20 Km.
- Hay otro tipo de pérdidas, lo que hace que finalmente se recoja sólo un fotón de cada 10^{21} enviados.

¿Dónde se mide la distancia a la Luna?

Los centros dedicados a estas medidas son:

- Observatorio MacDonal en Texas (EE.UU.)
- El centro Aleakala de seguimiento de satélites en la isla Maui de Hawai (cesó en estas actividades)
- Apache Point Observatory Lunar Laser-ranging Operation (APOLLO) en el Apache Point Observatory de New Mexico (EE. UU.).
- Observatorio Côte d'Azur en Grasse (Francia).
- Centro di Geodesia Spaziale en Matera (Italia) (¿Futuro?)

La Tierra está loca, pero loca de verdad

- Lo que precede no es el final de esta historia.
- Las observaciones llevadas a cabo desde mediados del siglo XIX ponen de manifiesto que la aceleración aparente de la Luna no se corresponde con la variación regular provocada por las mareas.
- Incluso después de descontar el efecto de las mareas, la Luna mantiene un desplazamiento irregular, a veces de avance, en otras ocasiones de retraso, con respecto a su posición prevista, en una escala de varios decenios.
- ¿Se vuelve a deber esto a irregularidades de la rotación de la Tierra, o más bien a la dinámica lunar?
- Allá por 1915 se habían descartado todas las posibles explicaciones externas (materia invisible en el sistema solar, campos magnéticos, enjambres de meteoritos,...)

La Tierra es poco fiable

- Claro está, si el problema se debe a variaciones de la rotación terrestre, esto debe notarse también en desplazamientos de los demás objetos celestes.
- Pero claro, como los desplazamientos de los demás cuerpos en el cielo es más lento que el lunar, es muy difícil medir estas irregularidades.
- En 1939 H.S. Jones probó que tanto el Sol como Mercurio presentaban variaciones similares a las de la Luna al menos desde el comienzo del uso de los telescopios en el siglo XVII.

La Tierra es muy poco fiable

- Pero es que hay más, desde 1880 se sabe que la posición de las estrellas a lo largo del año varía apenas perceptiblemente, y ello se puede explicar debido a un movimiento de los polos terrestres.
- Este movimiento tiene dos componentes fundamentales, una con periodo anual y la otra de unos 435 días. La amplitud es del orden de 20 m.
- No hay que confundir estos movimientos con los de precesión y nutación: no son un cambio de orientación del eje en el espacio, sino un desplazamiento del eje en la superficie terrestre.
- Ver: http://en.wikipedia.org/wiki/Polar_motion
- Para rematar, a partir de 1930 se comprobó que la duración del día variaba al cambiar las estaciones, en una especie de versión en miniatura de la ecuación de tiempo, de forma que hay un retraso de unos 30 ms al principio de la primavera, y un avance comparable al principio de otoño.

La Tierra deja de servir como base para la medición del tiempo

El fin del patrón Tierra

Al llegar la década de 1940 se sabía no sólo que el día (solar medio) aumentaba su duración, sino que esta aumento no era uniforme, siendo más corto en verano que en invierno. Además los polos cabecean y, lo que es peor, existen fluctuaciones imprevistas e impredecibles (debidos probablemente a procesos desconocidos en el núcleo del globo terráqueo).

Los astrónomos llegaron a la (dolorosa) conclusión de que había que abandonar la Tierra como patrón para la medida y definición del tiempo.

El tiempo de las efemérides

- ¿Qué se puede usar en lugar de la Tierra como patrón básico?
- Una propuesta pionera se debió a A. Danjon, que sugirió usar la revolución de los planetas en torno al Sol.
- No obstante, no fue hasta 1948 que G. Clemence publicó una propuesta detallada en ese sentido: usar el tiempo utilizado por los astrónomos para calcular la posición del Sol como nuevo patrón base del tiempo.
- Esta posición se calcula mediante una fórmula debida a S. Newcombe, lo que da lugar a una tabla de valores de dichas posiciones que se suele llamar **efemérides**.
http://en.wikipedia.org/wiki/Newcomb's_formula
- A partir de ello es bastante sencillo conocer la hora: se miden la posición de la Luna y los planetas con respecto a las estrellas y se mira en las efemérides en qué momento deben de estar en esas posiciones. Esto se basa en la existencia de un tiempo newtoniano regular, claro está.

Dar la buena hora

- ¿Alguno de nosotros mira al cielo, la Luna o los planetas para saber a qué hora ha quedado?
- En realidad, se usan los **relojes**, que se pueden considerar, originalmente, como patrones secundarios de tiempo que permiten usar subdivisiones del día —tales como las horas, los minutos, los segundos— de manera práctica.
- Pero, ¿por qué no usar estos relojes como patrones primarios?
- Sería conveniente, de hecho, tener un reloj “bueno” que nos proporcione el patrón de tiempo. De alguna manera es lo que ya está sucediendo hoy en día.
- Pero primero debemos saber qué significa que un reloj sea un buen reloj.

- Cualquier reloj consta necesariamente de dos partes.
 - ① Un oscilador
 - ② Un contador
- El oscilador, o patrón de frecuencia, es el que proporciona una vibración repetitiva y periódica.
- Un oscilador por sí solo no es un reloj (pensemos en los metrónomos de los músicos), hace falta un contador que vaya registrando el número de oscilaciones y proporcione ese dato.

Calidad de los relojes

- La calidad de un reloj, su fiabilidad, depende de dos cosas, su **exactitud** y su **estabilidad**.
- La exactitud mide su capacidad para dar una medida de tiempo, digamos un segundo, de manera exacta. Se suele medir dando la cantidad que atrasa/adelanta por día.
- La estabilidad es su capacidad de mantener una tasa de avance constante. Un reloj es pues estable si es capaz de dar su medida de tiempo (el segundo) de manera congruente durante un largo periodo (puede ser inexacto si por ejemplo se retrasa mucho, pero si cada jornada se retrasa lo mismo, es estable).
- La propiedad más importante es la estabilidad, ya que entonces se puede, normalmente, conseguir mejorar la exactitud regulándolo.

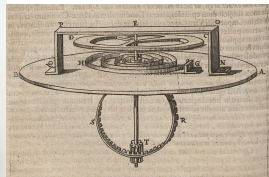
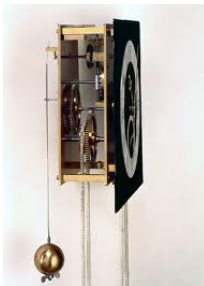
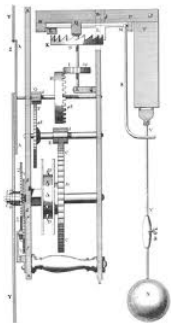
Los relojes de péndulo

- Hasta el siglo XX los relojes más precisos usaban **péndulos** como osciladores.
- La idea se remonta a 1580 con Galileo, que descubrió que el periodo de un péndulo depende esencialmente de su longitud ℓ , de manera que bastaba con tratar de mantener una amplitud constante de las oscilaciones para conservar un periodo constante.
- Hoy escribimos esto (φ es la semi-amplitud angular máxima):

$$T = 4\sqrt{\frac{\ell}{g}} \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - \sin^2 \varphi \sin^2 \theta}}$$
$$\simeq 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}} \left(1 + \frac{1}{4} \sin^2 \varphi + \dots \right)$$

C. Huygens

- C. Huygens fue quien primero dedujo la ley del periodo del péndulo (aproximada) y llevó las ideas de Galileo a la práctica construyendo un reloj de péndulo en 1656 con un mecanismo simple de corrección de las pequeñas variaciones del periodo de oscilación con la amplitud.



- También creó el *resorte en espiral regulador*, que continúa usándose en la actualidad en relojes de bolsillo.

Los problemas del reloj de péndulo

- Los péndulos son sensibles a cualquier cambio de longitud. En particular, la dilatación y contracción provocada por cambios de temperatura. Por ello se usan aleaciones poco dilatables como el invar (Fe + Ni).
- También hay que tener en cuenta la sutil influencia de la gravedad terrestre. Al cambiar g con la latitud, o con la altura, cambia el periodo.
- Además, el balancín debe hacer funcionar el resto del reloj (las agujas, por ejemplo) lo que provoca que vaya perdiendo energía paulatinamente. La fricción y la resistencia del aire empeoran esta pérdida de energía. Por ello hace falta un aporte regular de energía, que tradicionalmente consistía en un sistema de pesas que bajan lentamente, pero el diseño debe ser muy cuidadoso para obtener el objetivo deseado.

El reloj de Shortt

- El reloj ideado por W. Shortt es el mejor de la historia en la categoría de relojes mecánicos. Se usaron en la década del 1920.
- Tiene dos balancines: el péndulo **maestro** que oscila libremente en el vacío dentro de un tanque de cobre; y el péndulo **esclavo**, de precisión, a pocos decímetros de distancia.
- Cada 30s el esclavo mandaba una señal eléctrica al maestro, lo que le daba el “empujoncito” necesario para mantener el periodo de oscilación.
- A cambio, el maestro se aseguraba, vía una unión electromagnética, que el esclavo permanecía en fase con él.
- Este fue el primer reloj más exacto que la Tierra misma, y fue usado en 1926 para detectar los pequeños cambios en la rotación terrestre. Llegaron a alcanzar una excelente precisión de 1 s/año.
- Fueron los mejores hasta la llegada de los relojes de cuarzo allá por 1940.

Un reloj de Shortt



Los relojes de cuarzo

- El cuarzo es el segundo mineral más abundante en la Tierra, compuesto de dióxido de silicio o sílice, SiO_2 . Se suele presentar en forma de cristales transparentes.
- El cuarzo se comporta como otros objetos resonantes, por ejemplo una campana. Las oscilaciones del cuarzo son vibraciones del cristal que emiten una nota extremadamente estable de alta frecuencia (inaudible, son ultrasonidos) que depende solamente de la forma y la talla de la lámina usada.
- Además, tiene unas propiedades **piezoeléctricas** que lo hacen un excelente oscilador: cuando se comprime un cristal de cuarzo, aparece una tensión eléctrica entre sus caras. Recíprocamente, si se someten sus caras a una tensión eléctrica, el cristal se contrae o dilata en concordancia.
- Por tanto, un cristal de cuarzo que vibra a una cierta frecuencia produce una señal eléctrica de exactamente esa frecuencia. Esta señal puede redirigirse al cristal para mantenerlo oscilando.

Los relojes de cuarzo

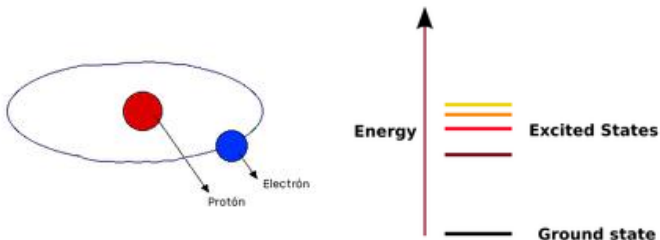
- Se puede escoger la frecuencia a la que el cuarzo va a vibrar determinando la forma y talla de la lámina. El rango factible es de $10^3 - 10^7$ Hz.
- En el caso de los relojes es necesario escoger frecuencias no muy altas para que las oscilaciones puedan ser contadas.
- En los relojes de cuarzo modernos esta frecuencia es a menudo 32768 Hz = 2^{15} Hz . Esta elección permite, disminuyendo la frecuencia a la mitad —mediante circuitos electrónicos— 15 veces, obtener una oscilación por segundo.
- Aunque estos relojes son también sensibles a las condiciones ambientales, en seguida desterraron los relojes de Shortt y hoy en día son omnipresentes.
- Aunque para medidas muy exactas son claramente superados por los relojes atómicos, siguen siendo una herramienta esencial para llevar un tiempo bastante exacto cotidianamente.

La prehistoria de los relojes atómicos

- Al principio del siglo XIX los físicos sabían que el espectro del Sol estaba atravesado por rayas oscuras, muchas de las cuales se correspondían con líneas brillantes observadas en el espectro de ciertas llamas.
- R. Bunsen y G. Kirchhoff demostraron que estas rayas oscuras eran características de los elementos químicos: cada elemento producía su propia familia de rayas, en longitudes de onda bien definidas.
- Aunque entonces nadie sabía nada acerca de los procesos de emisión y absorción de la luz por los átomos, se deducía que los átomos están dotados de frecuencias características de vibración que permiten emitir y absorber luz.
- Esto permitió a W. Thomson (Lord Kelvin) sugerir que los átomos de H o de Na eran patrones naturales de vibración, en cantidad prácticamente ilimitada, con propiedades físicas idénticas, independientes de su localización en el Universo y probablemente inmutables durante toda su existencia.

¿Hidrógeno?

- Como se sabe el átomo más sencillo es el de H. Sólo tiene un protón en el núcleo, y un electrón que quedan ligados por su atracción eléctrica.
- El 99,9% de la masa del átomo está en el protón que, por lo tanto, se puede visualizar como inmóvil mientras que el electrón se encuentra en una especie de “nube” orbital a su alrededor. La física cuántica nos enseña que el electrón sólo puede estar en unos estados orbitales concretos definidos por su energía.



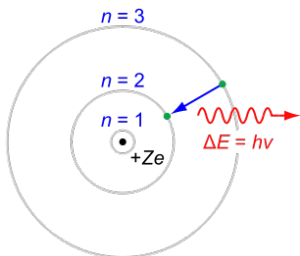
¿Hidrógeno?

- En su estado fundamental el electrón está a una distancia media de $0,053\text{nm}$ del núcleo. Pero como se sabe el electrón puede absorber fotones de determinadas energías que lo hacen “saltar” a los estados excitados, cada uno de ellos definido por una energía concreta, cuantizada.
- De los estados excitados más altos el electrón puede saltar espontáneamente a los más bajos emitiendo un fotón con esa diferencia de energía. Esto da lugar a las líneas características de su espectro (lo mismo ocurre para cualquier otro átomo), y a las emisiones características de luz, véase la nebulosa de Orión



La serie de Balmer

- Esos colores rojizos se deben a la línea $H\alpha$ (la del salto de $n = 3$ a $n = 2$) de la serie de Balmer (las emisiones que acaban en el primer estado excitado con $n = 2$)



- La serie de Balmer tiene varias líneas en el espectro visible:



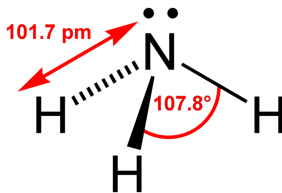
La línea de la derecha tiene una longitud de onda de 656,3nm, por lo que es luz de color rojo, y se corresponde con la $H\alpha$.

¿Hidrógeno?

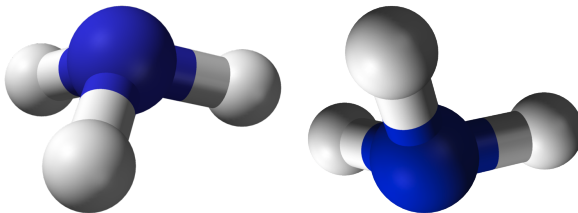
- Dado que todos los átomos de H son idénticos y abundantes, siguiendo la sugerencia de Kelvin se puede pensar en usar este tipo de transiciones, digamos la $H\alpha$, como patrón de frecuencia. Bastaría con calentar el H para que pase al nivel excitado deseado y esperar su decaimiento.
- Pero claro, esto simplemente nos proporciona el oscilador de un reloj. Falta el contador. Y un problema surge porque la frecuencia de la línea $H\alpha$ es del orden de 10^{14} Hz. ¿Cómo se pueden contar los ciclos de un oscilador que hace tic-tac 10^{14} veces por segundo?
- Este problema lo tienen de hecho todas las emisiones atómicas en luz visible, no importa de qué elemento.
- Hace falta, por consiguiente, encontrar transiciones atómicas que emitan en frecuencias más manejables, o sea, más bajas.

¿El amoniaco?

- El amoniaco es la molécula NH_3 .

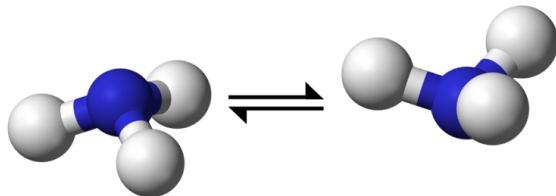


- Se presenta en dos versiones:



¿El amoniaco?

- Estos dos estados tienen diferentes energías, pero la diferencia es pequeña y en realidad cuánticamente el amoniaco está en una superposición de ambos. De esa manera, puede pasar espontáneamente del uno al otro:



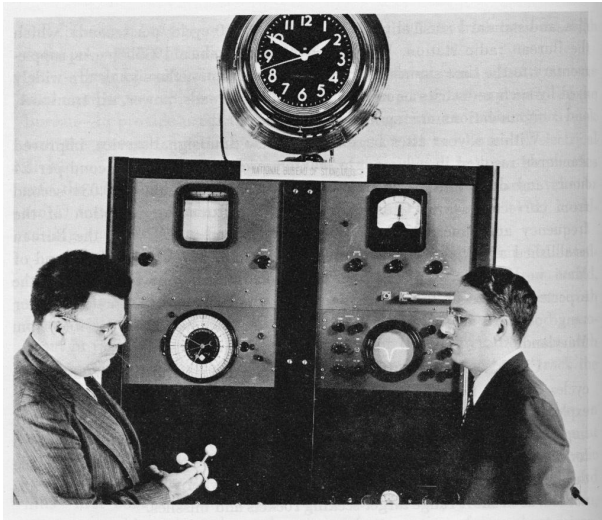
- La diferencia de energía entre estos dos estados corresponde a una frecuencia de 23870MHz, o sea, a un fotón de longitud de onda de $\lambda = 1,26\text{cm}$. Esto está en el rango de las microondas.

¿El amoniaco?

- Pero esas longitudes de onda (en general las ondas de radio) habían sido usadas en los radares (durante la guerra) y se sabía cómo manejarlas, aparte de la existencia de muchos aparatos de radar, sobrantes de la época bélica.
- El amoniaco es un gas molecular que suele presentarse en una mezcla de los estados anteriores en cantidades prácticamente iguales. Enviando un haz de microondas de la frecuencia adecuada a través del gas, la mitad en el estado de menor energía absorberá los fotones y pasará al estado superior. Se puede entonces ajustar el proceso de manera que la absorción sea máxima, lo que ocurre exactamente a la frecuencia previa.
- Es necesario resaltar que lo anterior no depende de qué manera se construya el dispositivo (al contrario que con los relojes de cuarzo o péndulo). Sólo depende de la propiedades del amoniaco.

El reloj de amoníaco (primer reloj “molecular”)

En 1948 este reloj, inventado por Harold Lyons (derecha) fue construido en el National Bureau of Standards (NGS) de los EE.UU.



Los problemas del reloj de amoniaco

- El reloj de amoniaco llegó a alcanzar una estabilidad de 2×10^{-8} , apenas superior a los relojes de cuarzo o la rotación terrestre. Además, no se pudo conseguir que funcionase más de unos días seguidos.
- Su limitación principal fue que la gama de frecuencias de absorción era demasiado grande, en lugar de absorber sólo la frecuencia de inversión del amoniaco.
- Esto se debe al **efecto Doppler**. A temperatura ambiente las moléculas de NH_3 tienen velocidades aleatorias en todas direcciones del orden de $\sim 500\text{m/s}$. Ello hace que algunas vayan a contracorriente del haz de microondas y absorban una frecuencia más elevada (o si se quiere, desplazada hacia el azul), mientras que las que se mueven a favor lo harán en una frecuencia menor (hacia el rojo).
- El resultado es que existe una banda amplia de frecuencias susceptibles de ser absorbidas, lo que claramente disminuye la precisión como patrón de frecuencias.

Vuelta al Hidrógeno: la estructura hiperfina

Spin-orbit coupling in H-atom

- o Fine structure of H-atom is due to spin-orbit interaction:

$$\Delta E_{so} = \alpha \frac{Z\hbar}{2m^2cr^3} \hat{S} \cdot \hat{L}$$

- o If L is parallel to $S \Rightarrow J$ is a maximum \Rightarrow high energy configuration.

- o Angular momenta are described in terms of quantum numbers, s , l and j :

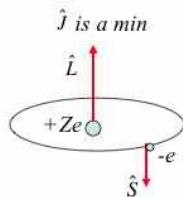
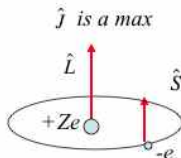
$$\hat{J} = \hat{L} + \hat{S}$$

$$\hat{J}^2 = (\hat{L} + \hat{S})(\hat{L} + \hat{S}) = \hat{L}\hat{L} + \hat{S}\hat{S} + 2\hat{S} \cdot \hat{L}$$

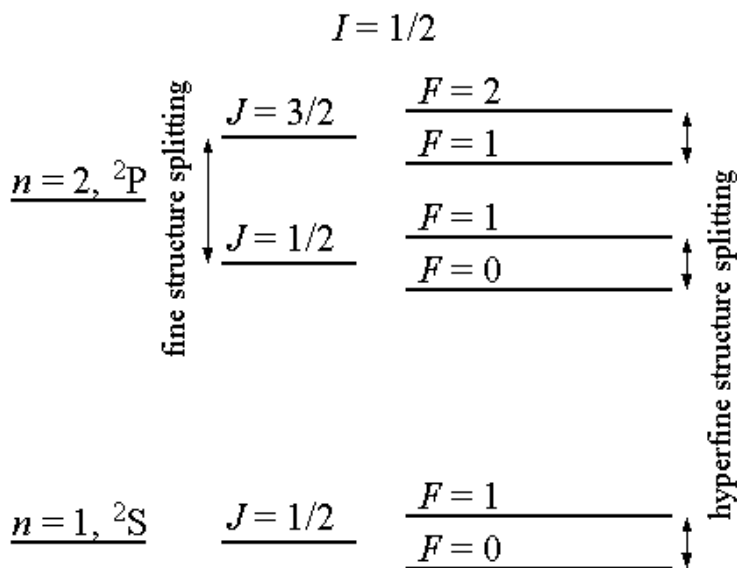
$$\hat{S} \cdot \hat{L} = \frac{1}{2}(\hat{J} \cdot \hat{J} - \hat{L} \cdot \hat{L} - \hat{S} \cdot \hat{S})$$

$$\Rightarrow \hat{S} \cdot \hat{L} = \frac{\hbar^2}{2}[j(j+1) - l(l+1) - s(s+1)]$$

$$\therefore \Delta E_{so} = \alpha \frac{Z\hbar^3}{4m^2c} \frac{1}{r^3} [j(j+1) - l(l+1) - s(s+1)]$$



La estructura hiperfina del átomo de H



La estructura hiperfina del átomo de H

- Para el H, la diferencia de energía entre los dos niveles en los que se separa el estado fundamental produce un fotón con longitud de onda $\lambda = 21\text{cm}$.
- Esto corresponde a una frecuencia de 1420MHz , en el rango de las microondas, mucho más manejable que las de $H\alpha$ y, como hemos visto antes, susceptibles de ser domeñadas por espectroscopía de radio usando rádares.
- La correspondiente línea espectral se llama **HI, o de los 21cm, o del hidrógeno**, y se usa repetidamente en radio-astronomía: al estar en frecuencia de radio, atraviesa fácilmente la atmósfera terrestre y puede ser observada casi sin interferencia. Se usa en múltiples aplicaciones de gran importancia, tanto en cosmología como en física galáctica.

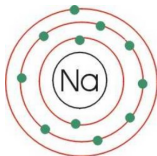
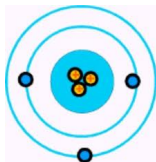
Los metales alcalinos

- Aunque el H es el único elemento con un solo electrón, existen otros elementos que se le parecen mucho en ese sentido.
- Los metales alcalinos se caracterizan por tener un electrón singular, en un orbital más alejado que el resto. Por ello está más débilmente ligado que el resto de sus congéneres.
- Los demás electrones están apareados de tal manera que el momento magnético de cada e^- se compensa con el de su pareja, y el efecto global para todos los electrones de los niveles internos es nulo.
- Por ello, los únicos efectos magnéticos en los metales alcalinos son debidos al núcleo y al e^- externo.
- Por esta razón, este e^- solitario se comporta, en muchos aspectos, como el e^- del átomo de H. Y en particular da lugar a un par de **estados hiperfinos**, con transiciones entre ellos análogas a los del H.

Los metales alcalinos

Grupo → ↓ Período	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1	1 H																		2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
6	55 Cs	56 Ba		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
7	87 Fr	88 Ra		104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo	
Lantánidos	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu				
Actínidos	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr				

Los metales alcalinos

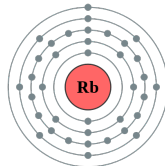
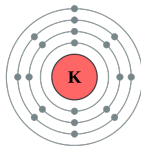


19: Potassium

2,8,8,1

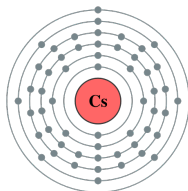
37: Rubidium

2,8,18,8,1



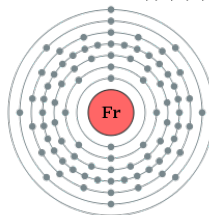
55: Caesium

2,8,18,18,8,1



87: Francium

2,8,18,32,18,8,1



- En 1860 Bunsen y Kirchhoff (otra vez ellos), con sus trabajos pioneros de espectroscopía, descubrieron un nuevo metal caracterizado por la existencia de dos líneas azules. Por eso lo llamaron **Cesio** (del latín *caesius*, azul).
- El cesio es un metal plateado con propiedades sorprendentes:
 - ① es tan blando que se puede untar como la mantequilla.
 - ② si se sumerge en agua crepita violentamente y se fragmenta
 - ③ se funde a sólo 28°C (se derrite si se tiene en la mano —¡no aconsejable!)
 - ④ de entre todos los átomos estables, es el de mayor diámetro.
- De todas formas, no son éstas las propiedades que lo hacen adecuado para actuar de oscilador en un reloj atómico.

Isidor Isaac Rabi (1898-1988)



La propuesta básica de Isidor I. Rabi

- En 1944 Isidor Rabi recibió el Premio Nobel de física por sus trabajos sobre las propiedades magnéticas de los núcleos.
- Un año después presentó su pionera e inspiradora propuesta de construir un reloj atómico basado en el ^{133}Cs .
- La idea se basaba en el uso de chorros atómicos de cesio, y en utilizar sus propiedades de resonancia magnética nuclear.
- Pero, ¿por qué el cesio y no el H, u otros metales alcalinos?

Las ventajas del cesio ^{133}Cs

- Para empezar, el ^{133}Cs tiene la transición hiperfina de más alta frecuencia de todos los alcalinos, con $\nu = 9193\text{MHz}$. Esto permite unas medidas de mayor precisión.
- La correspondiente $\lambda = 3,26\text{cm}$ está en pleno rango de las microondas.
- Todos los átomos de cesio son idénticos, no tiene isótopos naturales (los hay artificiales, como el radioactivo ^{137}Cs , pero estos sólo se producen en la fisión nuclear y tienen una semi-vida de 30,25 años). Por contra, el H —pongamos por caso— aparece en la naturaleza en proporciones de 1/7000 frente el Deuterio ^2H . De los alcalinos, sólo el Na y el Cs aparecen en la naturaleza de esta forma pura.
- Ello conlleva que todos los átomos de ^{133}Cs emiten o absorben a la misma frecuencia en su transición hiperfina.

Las ventajas del cesio ^{133}Cs

- Su baja temperatura de fusión implica que no es difícil hacerlo pasar a estado gaseoso.
- Una vez vaporizado, al ser el ^{133}Cs pesado, teniendo 55 protones y 78 neutrones en el núcleo ($55+78 = 133$), se mueve relativamente despacio, a unos 130m/s a temperatura ambiente (bastante más despacio que pongamos el aire). Esto permite reducir el problema del efecto Doppler.
- De todos los alcalinos, el ^{133}Cs es el más grande (a excepción del ^{223}Fr). Esto hace que el solitatio e^- externo esté más débilmente ligado y sea más fácil extraerlo, lo que facilita su detección.
- El Fr queda descartado completamente porque no tiene ningún isótopo estable: el menos inestable de todos es el ^{223}Fr , que es fuertemente radioactivo y posee una semi-vida inferior a media hora.

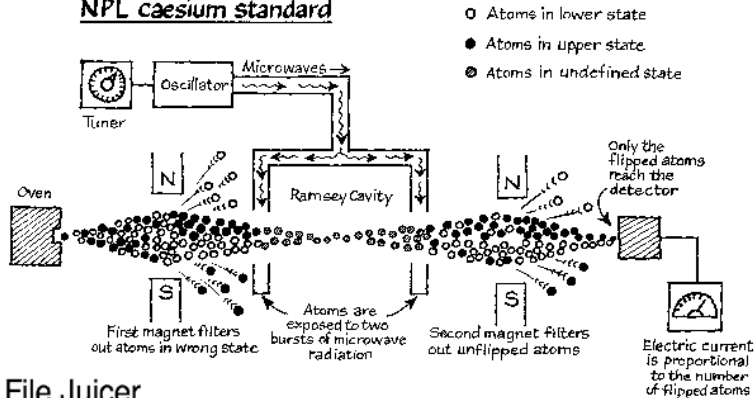
El primer patrón de chorro de cesio

- Los primeros en construir un patrón atómico de chorro de cesio fueron L. Essen y J.J. Parry, en el *National Physical Laboratory* del Reino Unido, allá por 1955.
- El objetivo básico es hacer sintonizar las vibraciones de un oscilador de cuarzo ultra-estable con la frecuencia de la transición hiperfina del cesio.
- Todos los elementos del sistema se encuentran en un recinto donde se ha hecho el vacío para que las moléculas de aire no impidan que los chorros de cesio se muevan en línea recta.
- En un extremo hay un horno que contiene (1g o menos) de cesio calentado a 200°C. Estos átomos calientes salen por una ranura estrecha a una velocidad de $\sim 200\text{m/s}$, formando el llamado **chorro de cesio**.

- El chorro es una mezcla: aproximadamente la mitad de los átomos están en el estado hiperfino bajo, y la otra mitad en el alto. Lo primero es separarlos.
- Para ello se pasa el chorro por un imán especialmente diseñado (Stern-Gerlach). Como los átomos de cesio son magnéticos se desvían por el campo magnético del imán de acuerdo a sus estados cuánticos, emergiendo en dos direcciones ligeramente diferentes. El diseño geométrico asegura que los átomos en el estado alto de energía salen por la parte superior del chorro, y los otros por la inferior.
- Entonces se les puede hacer cambiar de estado exponiéndolos a ondas de microondas de la frecuencia de transición. Hay que notar que los átomos ignorarán cualquier fotón que no sea de la frecuencia precisa, pero responderán a los de la frecuencia adecuada de 9193MHz.

El primer patrón de chorro de cesio

NPL caesium standard

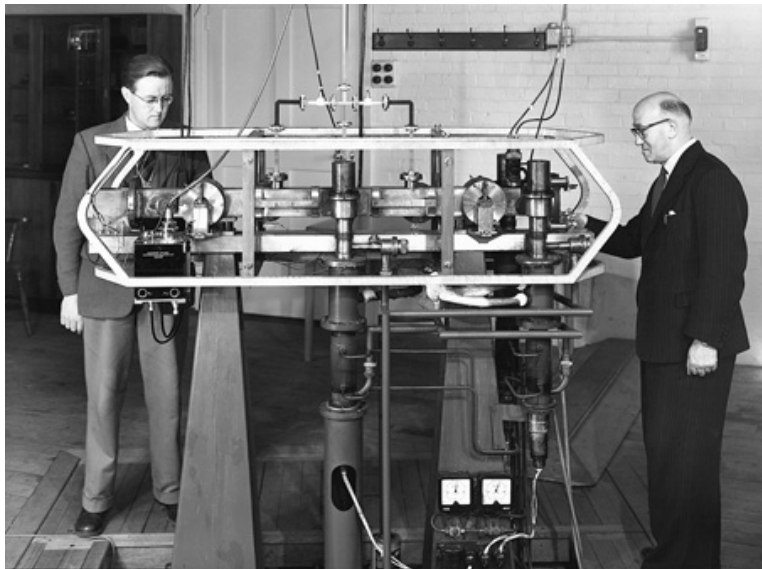


- Los átomos en el estado bajo que choquen con un tal fotón lo absorberán pasando al de energía alta, mientras que los que están en el de alta energía, si chocan que uno de esos fotones, emitirá otro de la misma frecuencia y bajará al estado de menos energía. En ambos casos lo que ocurre es que el e^- solitario externo cambia su orientación del spin cambiando el estado del átomo.
- En la máquina original del NPS se siguió entonces un método ideado por Norman Ramsey en 1949 (por el que le concedieron el premio Nobel 40 años más tarde). La idea es no hacer pasar los átomos por un largo tubo (como en la propuesta original de Rabi) sino más bien hacerlos pasar brevemente por dos cortos fogonazos de microondas. Esto no sólo simplifica las cosas, sino que además aumenta la eficacia de la máquina.
- Las microondas se envían a través de una guía de ondas que se bifurca en dos brazos en forma de \cap —y que se conoce como la cavidad de Ramsey—. El chorro pasa primero por un agujero al final del primer brazo de la \cap y después por otro similar en el otro brazo.

- En cada uno de los cruces los átomos reciben un fogonazo idéntico de microondas. Si la frecuencia se ha ajustado para que sea la de transición, el primer fogonazo pone el chorro en un estado cuántico mezcla de ambos estados hiperfinos y el segundo completa la transición al estado opuesto.
- La precisión de la frecuencia de transición es tanto mejor cuánto mayor sea el intervalo que pasa el chorro entre los dos fogonazos.
- Dado que el chorro se mueve en direcciones prácticamente paralelas y como la radiación de microondas se dirige en ángulo recto al chorro, los fotones chocan con los átomos de "costado", valga la expresión, y no "de frente". Esto implica que no hay efecto Doppler y, por lo tanto, en contraste con el reloj de amoniaco, la frecuencia se mantiene perfectamente definida.
- Cuando salen del segundo brazo de la cavidad de Ramsey el chorro vuelve a estar compuesto de átomos de dos clases: los que han sufrido una transición y los que no.

- Un segundo filtro magnético de Stern-Gerlach los separa de manera análoga al principio. La geometría del aparato se concibe de tal manera que los átomos que han cambiado de estado se focalizan hacia un detector y los que no, se desechan.
- El detector es un simple alambre al rojo vivo enfrente de una placa metálica. Como el e^- externo del cesio está débilmente ligado al resto del átomo la temperatura del alambre basta para extraer ese e^- y dejar que el correspondiente ion (positivo) de cesio sea detectado en la placa —que está cargada negativamente—.
- Esto produce una corriente en la placa cuya intensidad es simplemente proporcional al número de átomos que cambiaron de estado.
- Igual que con el reloj de amoniac, el truco consiste ahora en sintonizar el transmisor de microondas de manera que la placa detectora alcance un pico máximo. En ese punto se sabe que la frecuencia de las microondas debe ser exactamente la de transición del cesio (**resonancia**).

El primer patrón de chorro de cesio



- Una de las primera cosas que hicieron Essen y Parry fue medir la duración de un segundo en términos de la transición hiperfina del cesio. El resultado fue que 1 segundo (en el sentido de día solar medio) era igual a 9192631830 ± 10 ciclos de la frecuencia del ^{133}Cs . Ninguna cantidad física se había medido con tanta precisión.
- ¿Era la máquina un reloj? Bueno, en realidad le faltaba el contador, pero era un oscilador excepcionalmente estable. Como se usaba para calibrar los relojes de cuarzo, sirvió de patrón para establecer una escala de **tiempo atómico**. Y los relojes de cuarzo actuaban como la “cara” de los relojes atómicos.
- Al principio alcanzó una exactitud de 10^{-9} pero rápidamente se mejoró a 2×10^{-10} .
- Actualmente, el mejor reloj es el NPL-CsF2 con una precisión medida de $2,6 \times 10^{-16}$, o lo que es lo mismo, un segundo en 138 millones de años.

Los relojes del futuro

¿Relojes nucleares en vez de atómicos?

El super-reloj de Torio:

<http://www.newscientist.com/article/mg21228374.500-nuclear-clock-could-steal-atomic-clocks-crown.html>