

En este trabajo se explicará un poco sobre la historia, desarrollo, evolución y el funcionamiento de los relojes atómicos. Hoy en día el segundo está definido por el número de oscilaciones (frecuencia) de un átomo de Cesio, precisamente por 9, 192, 631, 770 oscilaciones. Con esta definición se logra que el segundo tenga un error de tan sólo 1×10^{-15} haciéndolo la constante física con mayor precisión en cualquier ámbito de la física. Este trabajo está basado en artículos del NIST y en varias páginas web, como la del premio nobel. [1] [2] [3][4] [5] [6]

I. INTRODUCCIÓN

Aunque el tiempo es una cantidad muy importante en la física y otras áreas del conocimiento (como la historia por ejemplo), es un concepto muy difícil definir. Lo usamos sin cuestionar su origen y su naturaleza. En la mecánica clásica, el tiempo juega un papel esencial, pues este nos da la evolución de los sistemas. En esta teoría el espacio y el tiempo son independientes y por tanto absolutos, más tarde, con la teoría de la relatividad, el tiempo y el espacio se mezclan para formar un sólo objeto, el espacio-tiempo. La teoría de la relatividad (especial y general) ha sido corroborada mediante múltiples experimentos; cabe mencionar que las verificaciones más precisas de esta teoría son gracias a los relojes atómicos. Existe otra problemática con el tiempo, esta es, si el tiempo es continuo o discreto, si existe un tiempo tan pequeño que para lapsos más pequeños que este tiempo el universo no sufra ningún cambio. Se cree que este tiempo mínimo está dado por el tiempo de Planck. Para definir el tiempo de Planck primero se define la distancia de Planck

$$l_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}},$$

la cual se cree la distancia mínima para la cual el espacio tiene geometría clásica. Luego, el tiempo de Planck es el tiempo que le toma a la luz recorrer esta distancia. De esta forma

$$t_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}}. \quad (1)$$

Aunque estas preguntas aún no se responden, el tiempo sigue siendo uno de los conceptos más fundamentales de la física y es medido con la mayor precisión existente. Los relojes atómicos de hoy en día tienen una exactitud de un segundo en un millón de años, o bien $1\mu s$ en un año. Dada esta exactitud, en 1967 se decidió reemplazar la definición astronómica en términos de una transición hiperfina particular del átomo de Cesio. La frecuencia de esta transición es de 9, 192, 631, 770 Hz.

Además, dado que la velocidad de la luz es una constante universal, $c = 299,792,458 m/s$. Con ello, una vez que se defina el segundo, con la velocidad de la luz se define el metro. Más aún, gracias al efecto Josephson, el cual relaciona el voltaje con la frecuencia mediante un factor de constantes universales, $2e/\hbar$, se puede definir al voltaje en términos del segundo. Por tanto, una vez definido el segundo, se puede definir cualquier cantidad física que se desee.

Debido a esta preocupación sobre el tiempo, se desarrolló lo que hoy en día se conoce como *Atomic Frequency Standards* (Estándares de Frecuencia Atómicos). Esta área de la física se encarga de medir con gran precisión la frecuencia de la radiación electromagnética de transiciones atómicas. Los estándares para el Cesio se usaron para definir al segundo, más tarde estándares del hidrógeno se usaron como relojes atómicos secundarios encargados de sincronizar a los relojes de Cesio. También, los estándares del rubidio se usan para las telecomunicaciones y sistemas de navegación, pues no se necesita tanta estabilidad en la frecuencia y el tamaño de los relojes es pequeño.

A. Los primeros estándares

Los estándares de frecuencia se refieren a un evento periódico que se repite a un ritmo constante. Este evento periódico es producido por un aparato llamado resonador. Este resonador es manejado por una fuente de energía, estos dos aparatos juntos forman un oscilador. El oscilador opera a un ritmo llamado frecuencia resonante.

Para poder medir mejor el tiempo, se han buscado cada vez mejores osciladores. Los mejores osciladores son aquellos que tienen un periodo (frecuencia) bien caracterizado, difícil de perturbar y es lo más estable posible. Primero, se tomó como oscilador la rotación de la tierra, y el segundo fue definido como una fracción ($1/86400$) del día solar. Como los días solares fluctúan mucho, más tarde se optó por tomar un promedio de esta fracción. Una unidad de tiempo más estable era el movimiento de la tierra alrededor del sol. En 1956, se define al segundo como ($1/31556925.9747$) partes del año tropical 1900 y fue adoptado como el segundo en el SI.

La definición de este segundo era impráctica y difícil de medir. Por ello, a partir de 1642 y durante 300 años, los relojes de péndulo dominaron la medida más exacta del tiempo. La

*Electronic address: sidd.morales@ciencias.unam.mx

exactitud de estos relojes era cercana a unos cuantos segundos por año ($\approx 1 \times 10^{-7}$). El NBS (National Bureau of Standards), ahora NIST, usó por 25 años (1904-1929) un reloj de péndulo como el estándar de tiempo.

El primer estándar de frecuencia fue creado por Walter Cady. Él patentó en 1923 un resonador de cuarzo. Los osciladores de cuarzo se basan en el efecto piezoeléctrico descubierto por P. Curie en 1880. En 1929 los estándares del NBS eran 4 osciladores de cuarzo de $100 - kHz$ con una incertidumbre de 1×10^{-7} . Para 1950 esta incertidumbre logró reducirse a 1×10^{-9} , logrando una mejor incertidumbre que los relojes de péndulo.

B. Osciladores atómicos

Los osciladores atómicos tienen muchas ventajas sobre los ya mencionados. Una transición atómica es idéntica en cualquier átomo (sin perturbaciones externas). El problema con los osciladores de cuarzo es que su frecuencia depende de su forma, y es casi imposible hacer dos cristales iguales. Además, hasta donde se sabe, los átomos no cambian sus propiedades conforme el tiempo. Con estas observaciones Lord Kelvin en 1879 propuso a los átomos como osciladores para definir el tiempo. 60 años después de su propuesta se comenzó a crear la primera instrumentación.

El principio de los osciladores atómicos es simple. Dado que las propiedades de los átomos son iguales, estos deben producir la misma frecuencia cuando absorben o liberan energía. Esta frecuencia está dada por

$$f = \frac{E_2 - E_1}{\hbar} \quad (2)$$

donde E_1 y E_2 son las energías en los diferentes niveles del átomo.

Si bien hay muchas limitaciones en la estabilidad y precisión de los resonadores atómicos, la más notable es el corrimiento de las frecuencias por efecto Doppler y la interacción entre los átomos. Por ello, hoy en día se lleva a una muestra de átomos a temperaturas cercanas del 0 absoluto para detener su vibración e interacciones.

C. Estándar de frecuencia del cesio

El estándar de frecuencia usando átomos de Cs y la aproximación mediante un campo magnético separado, fue propuesto por Ramsay en 1950 e implementado en 1955 (Essen y Parry). El desarrollo de este estándar mostró un gran avance y después de la construcción de muchos laboratorios, la frecuencia de una transición hiper-fina del estado base del cesio fue adoptada como la definición del segundo por la Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM, 1967-1968). Esta definición ha permanecido hasta nuestros días.

El por qué se usan átomos de Cs en los relojes atómicos tiene un gran número de razones y ventajas sobre otro átomos.

En particular, el Cs tiene un sólo isótopo estable ^{133}Cs , el cual es relativamente abundante en la naturaleza. Su temperatura de fusión es 28.4°C . Su energía de ionización es baja, 3.9eV , haciéndolo fácil de detectar por procedimientos convencionales (ej. ionización por un alambre caliente y contador de iones). Finalmente, el Cs tiene una transición hiperfina del estado base que cae dentro de la banda X, una región de las microondas muy estudiada, esto permite interacciones de los átomos con las microondas en cavidades de tan sólo centímetros. También, los átomos de cesio son relativamente pesados (133 uma), lo que provoca que se muevan a velocidades relativamente lentas ($\approx 130\text{m/s}$).

1. El estado base del cesio

El cesio es un átomo bastante complicado con estados base $F = 3$ y $F = 4$. Cada estado atómico es caracterizado no sólo por su número cuántico F si no también por un segundo número cuántico m_F , el cual puede tener valores entre $-F$ y F . Por tanto hay 16 estados magnéticos posibles del cesio, pero sólo la transición entre los estados $|4,0\rangle$ y $|3,0\rangle$ es útil para los estándares principales, pues la transición, a primer orden, es insensible con respecto a campos magnéticos. Esta transición hiperfina $|4,0\rangle \leftrightarrow |3,0\rangle$ es la usada para definir el segundo en el SI.

II. EL PREMIO NOBEL DE 1989

El premio Nobel de Física de 1989 fue otorgado a 3 investigadores, Norman F. Ramsey, Hans G. Dehmelt, Wolfgang Paul. Ramsey lo recibió por la invención de el método de campos oscilatorios separados y su uso en el maser de hidrógeno y otros relojes atómicos, y Dehmelt y Paul por el desarrollo de la técnica de trampa de iones que hizo posible el estudio de un sólo electrón o ion con mucha precisión.

El primer paso a la creación de instrumentos de alta precisión fue hecho por I.I. Rabi en 1937, cuando introdujo el Atomic-beam-magneticresonance method (ABMR). Rabi usó el hecho de que una transición entre los niveles atómicos podría ser inducida por medio de radiación, este hecho fue propuesto por Albert Einstein. Esto fue la base para otros métodos, como la resonancia nuclear magnética (NMR). El método de Rabi consistía en un chorro de átomos que pasan a través de un campo magnético homogéneo con un campo electromagnético oscilante. Este último campo es el que induce la transición atómica en los átomos.

En 1949 Norman F. Ramsey modificó el método de Rabi introduciendo dos campos oscilatorios separados, esto generaba un patrón de interferencia que era independiente de la homogeneidad del campo magnético. Esto mejoró la precisión del método ABMR. Más tarde, Ramsey mostró que podían usarse más de dos campos magnéticos separados por tiempo y no por distancia. Una aplicación de este método son los relojes atómicos de cesio, los cuales tienen una precisión de $1 : 10^{13}$

A. EL maser de hidrógeno

Otro método para almacenar y estudiar átomos fue desarrollado por Ramsay y D. Kleppner, el maser de hidrógeno. En él los átomos de hidrógeno en un estado excitado son llevados a un estado de auto-excitación. El ancho de banda es determinado por el tiempo que pasan los átomos dentro de la cavidad, el cual es cercano a un segundo.

Este aparato se inventó principalmente para analizar los estados hiperfinos del hidrógeno con una precisión muy alta, creando así el primer estándar de frecuencia para el hidrógeno. Este instrumento tiene una estabilidad mucho más grande que la del reloj de cesio, pero su exactitud absoluta es mucho menor. Por ello el maser de hidrógeno se usa como un estándar secundario y para mediciones de desplazamientos de frecuencia con gran precisión.

El maser de hidrógeno ha sido usado para medir la deriva continental y la verificación del corrimiento al rojo gravitacional.

III. MIDIENDO EL SEGUNDO CON UN RELOJ ATÓMICO DE FUENTE DE CESIO

El procedimiento experimental consiste en tres fases

1. Seis láseres posicionados en todas direcciones en ángulos rectos unos con los otros se disparan contra un grupo de átomos de cesio. Esta trampa atómica detiene a los átomos a un punto que casi dejan de vibrar. Este conjunto de átomos ultra-fríos llega a alcanzar los μK .
2. Una vez enfriados, los láseres superior e inferior son usados para lanzar a la muestra dentro de una cabina de microondas, y los átomos retroceden solos por efecto

de la gravedad. Este proceso de lanzar a los átomos y dejarlos caer es lo que le da el nombre de fuente al reloj atómico. La cabina de microondas se encarga de excitar (crear) las transiciones atómicas en los átomos de cesio mientras ellos suben y bajan.

3. Finalmente, el nivel de energía de la transición puede ser medido a través de la fluorescencia.

Este proceso se repite una y otra vez con diferentes frecuencias de microondas para encontrar la frecuencia a la cual el máximo número de átomos de cesio sufrió una transición atómica. Esta frecuencia es la frecuencia resonante (o frecuencia natural) del cesio, la cual es usada para definir el segundo en el sistema internacional de unidades.

IV. CONCLUSIONES

Gracias al avance tecnológico se ha podido medir el tiempo con una precisión inimaginable. Pasó de tener una precisión de 1×10^{-10} en los 50's a una de 1×10^{-15} en los 2000's. Hoy en día, el reloj atómico de fuente de cesio en el NPL puede medir el tiempo con una precisión de 1 en 158 millones de años. La siguiente generación de relojes atómicos en el NPL, usando iones o átomos enfriados por láser, podrán alcanzar exactitudes 100 mejores que las alcanzadas por los relojes actuales, es decir los nuevos relojes atómicos tendrán una incertidumbre equivalente al ganar o perder un segundo en la edad del universo.

Los osciladores atómicos, basados en transiciones de microondas, serán reemplazados por aparatos de transiciones ópticas y el segundo en el SI tendrá que ser definido otra vez. Se espera que estos aparatos tengan una incertidumbre de 1×10^{-17} .

-
- [1] J. Vanier and C. Tamescu, *The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards* (CRC Press, 2016).
 [2] T. P. H. Michael A. Lombardi and S. R. Jefferts, NCSL International measure **002**, 74 (2007).
 [3] *The nobel prize in physics 1989*, <http://githube/ata0k>, 4 de abril de 2018.
 [4] N. F. Ramsey, *Metrologia* **1**, 7 (1965), URL <http://stacks.iop.org/0026-1394/1/i=1/a=004>.

- [5] *How do atomic clocks work?*, <http://www.npl.co.uk/educate-explore/what-is-time/how-do-atomic-clocks-work>, 4 de abril de 2018.
 [6] *60 years of the atomic clock*, <http://www.npl.co.uk/60-years-of-the-atomic-clock/>, 4 de abril de 2018.