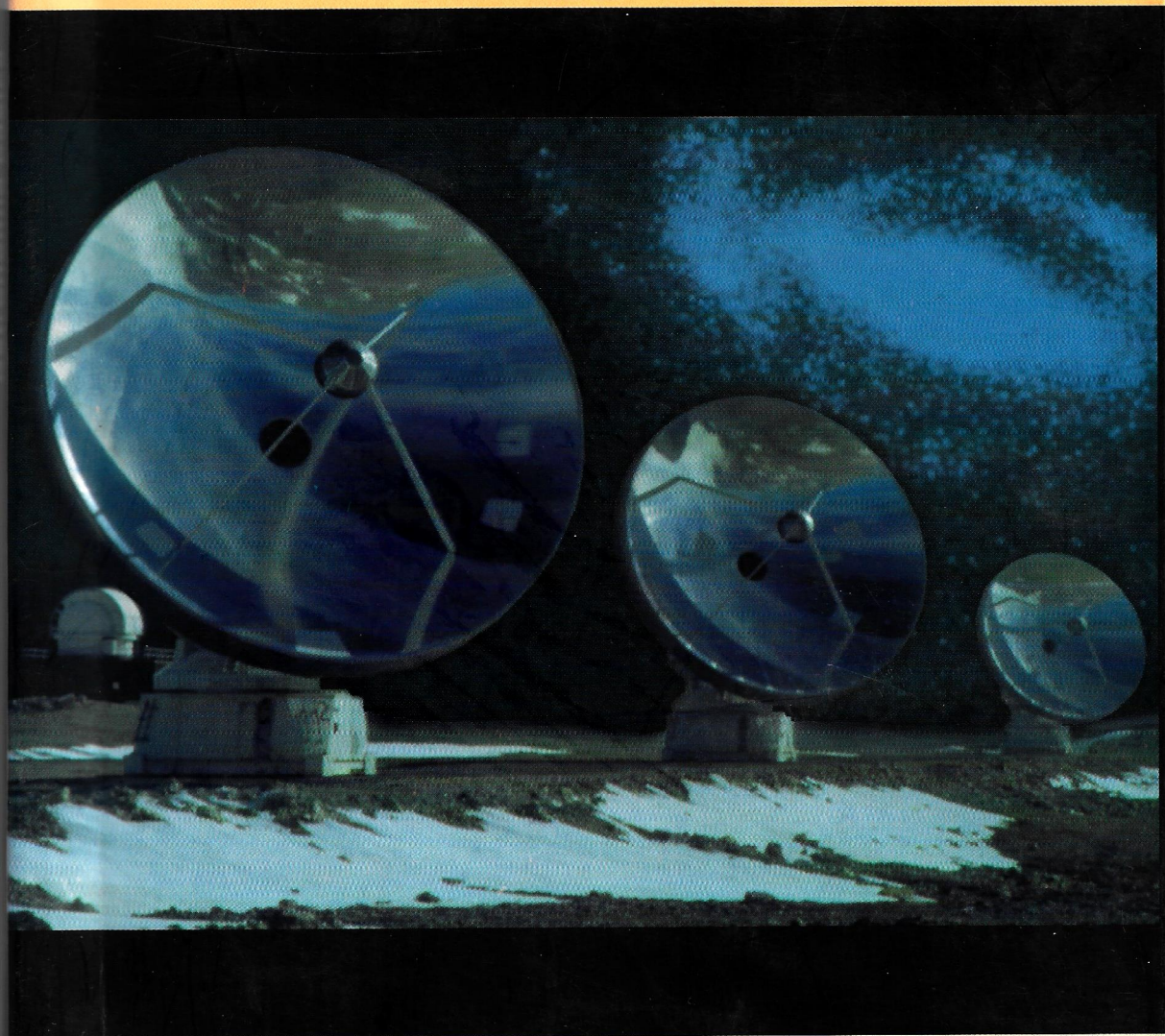


Astronomía básica

JOSÉ ANTONIO GARCÍA BARRETO



EDICIONES
CIENTÍFICAS
UNIVERSITARIAS

TEXTO CIENTÍFICO
UNIVERSITARIO

JOSÉ ANTONIO GARCÍA BARRETO

Astronomía básica



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

MÉXICO

Se prohíbe la reproducción total o parcial de esta obra
—incluido el diseño tipográfico y de portada—,
sea cual fuere el medio, electrónico o mecánico,
sin el consentimiento por escrito del editor.

D.R. ©, 2000, Universidad Nacional Autónoma de México
Edificio de la Coordinación Científica, circuito exterior,
Ciudad Universitaria, México, D.F.

D.R. © 2000, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA
Carretera Picacho-Ajusco 227, 14200 México, D.F.

ISBN 968-16-6092-7

Impreso en México

II. NOCIONES DE TIEMPO

¿QUÉ ES EL TIEMPO?

EL TIEMPO es una cantidad física que puede observarse y medirse con un reloj de naturaleza física, mecánica o eléctrica.

El *tiempo* es un componente de muchas fórmulas matemáticas y funciones físicas. Es uno de varios conceptos elementales que sirven de base para muchos sistemas de medición de fenómenos físicos. Otros conceptos básicos son la longitud, la temperatura y la masa de un objeto.

Las definiciones del diccionario nos dan una idea sobre el tiempo:

- *Tiempo*. Es un continuo no espacial en el cual ocurren eventos en una sucesión aparentemente irreversible desde el pasado, presente y hacia el futuro.
- *Tiempo*. El periodo durante el cual una acción o proceso ocurre; un momento definido, hora, día, año indicado por un reloj o calendario.

Un aspecto importante que contribuye a *no* comprender bien el significado de *tiempo* es que usamos una sola palabra, *tiempo*, para referirnos a dos conceptos distintos:

- el primero es *fecha* o *cuándo* ocurre un evento,
- el segundo es *intervalo de tiempo* o *lapso* de tiempo entre dos eventos.

Esta distinción es importante y resulta básica para los problemas involucrados al medir el *tiempo*.

FECHAS, INTERVALO DE TIEMPO Y SINCRONIZACIÓN

Nosotros obtenemos la fecha de un evento contando el número de ciclos y fracciones de ciclo de *eventos periódicos* tales como la aparición del Sol en el cielo y los movimientos de la Tierra alrededor del Sol; por ejemplo, la fecha de un evento puede ser 9 de junio de 1992 a las $14^h 30^m$ y 30^s donde *h*, *m* y *s* significan horas, minutos y segundos.

Un *intervalo de tiempo* puede o no estar asociado con una fecha; por ejemplo, una persona midiendo el movimiento de un atleta durante el maratón de la ciudad de México está interesada en cuántas horas, minutos, segundos y fracciones de segundo transcurren entre el momento en que el atleta empieza la carrera y el momento en el que atraviesa la línea de meta. Aquí la *fecha* sólo es importante si el atleta *debe* presentarse en tal lugar en un día determinado.

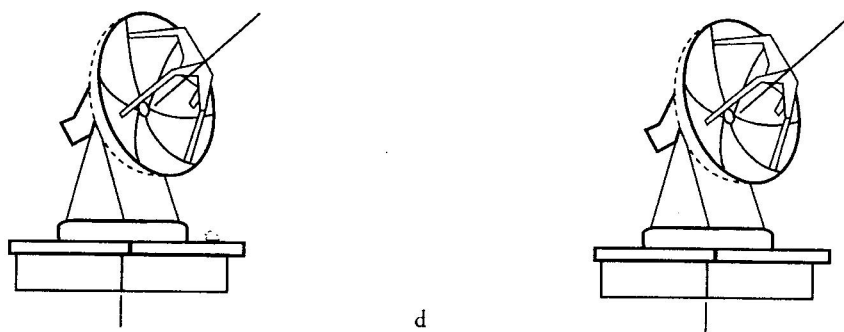
El *intervalo de tiempo* es de vital importancia en *sincronización*, lo cual significa literalmente *al mismo tiempo*. Por ejemplo, dos nadadoras que deseen realizar nado sincronizado puede que *no* estén interesadas en la fecha del evento o quizás menos en su duración. En este caso, a menos que naden *precisamente en sincronía*, su presentación no será buena. Así también por ejemplo, dos personas que deseen comunicarse mutuamente, a menos que su equipo esté precisamente sincronizado su comunicación puede ser nula.

La radioastronomía observacional y en especial con la técnica de radiointerferometría de base muy larga (en este caso *base* se refiere a la distancia entre un radiotelescopio y otro), se basa en la observación *simultánea* de un objeto celeste por medio de dos o más radiotelescopios que se encuentren unos de otros a cientos o miles de kilómetros, y en la grabación individual (en cinta magnética) de esa información. Para analizar posteriormente los datos es *necesario* que las observaciones se hayan realizado en forma *sincronizada*. En este caso no sólo importa que cada radiotelescopio observe en la misma fecha y a la misma hora, sino que es muy importante que tengan un dispositivo (reloj) que mida el *intervalo* entre cada segundo con la misma exactitud (figura II.1).

El problema de *sincronizar* dos o más aparatos que midan el *tiempo*, es decir, que esos aparatos midan un *intervalo de tiempo* en forma *precisa y exacta simultáneamente* con una precisión de quizás millonésimas de segundo, presenta un *reto* continuo a la física experimental, a la ingeniería eléctrica digital y en general a la tecnología aplicada.

MEDICIONES ANTIGUAS DEL TIEMPO

De la antigüedad hay sin duda vestigios de aparatos muy elaborados para medir el tiempo. Así tenemos los edificios de Chichen Itzá pertenecientes a la cultura maya, que junto con sus matemáticas sin duda eran la base de su *calendario*. El muy conocido Calendario azteca es otra evidencia de que esa cultura estaba fuertemente interesada en el tiempo. Me es difícil decir si el Calendario azteca era un sistema para sincronizar eventos con una precisión de millonésimas de segundo, pero



Distancia entre antenas

FIGURA II.1. Par de antenas o radiotelescopios que observan simultáneamente un mismo objeto celeste. Este par de radiotelescopios forma parte de un instrumento conocido como radiointerferómetro.

lo que sí parece claro, según los arqueólogos y antropólogos, es que esa piedra servía para medir *intervalos* de tiempo del orden de la vida humana, quizás años, meses, estaciones del año, etcétera. En otros lugares de la Tierra, también existen evidencias de *relojes antiguos* como los vestigios de Stonehenge en el sur de Inglaterra y las cavernas en Newrange en Dublín, Irlanda. Se ha demostrado que éstos fueron lugares para observar el movimiento de los astros. Así podemos decir que *astronomía* y *tiempo* eran de gran interés para las culturas antiguas en muchos lugares del orbe.

RELOJES EN LA NATURALEZA

Los movimientos del Sol, la Luna, los planetas y las estrellas son fáciles de observar y en una noche clara es muy difícil escaparse de estar conscientes de ello. Sin embargo, hay muchos otros ciclos y ritmos alrededor de nosotros todo el tiempo. Por ejemplo, biólogos, botánicos y otros bio-científicos estudian, aunque quizás no los entiendan completamente, muchos relojes internos que regulan procesos básicos en la vida, desde periodos de gestación animal, cosecha de granos, migración de pájaros y peces, hasta ritmos cardíacos y respiratorios. Los geólogos también hablan y escriben acerca de grandes ciclos o tiempos geológicos. Los físicos han identificado la tasa de decaimiento de átomos como el del carbono 14 con tal precisión que pueden decir con mucha exactitud la *edad* de algo que contenga C^{14} .

UN POCO SOBRE NOTACIÓN

Algunos científicos como geólogos y palentólogos piensan en *tiempo* en términos de miles o millones de años. Esto lo expresan con notación matemática conocida como potencias de diez; por ejemplo, mil años es 10^3 años. Un millón de años sería 10^6 años. Sin embargo, otros científicos como radioastrónomos, físicos, químicos e ingenieros piensan en términos de segundos, milésimas de segundo o millonésimas de segundo o quizás menores intervalos de segundo.

Así, la milésima parte de un segundo sería $1/1000$ seg o en notación decimal 0.001 seg. En notación con potencias de diez, se expresaría como 10^{-3} seg, y su denominación es milisegundo. El cuadro II.1 nos ilustra otras partes del segundo en notación con potencias de diez (o exponencial).

CUADRO II.1. *Nomenclatura y subdivisiones del segundo*

Notación		
decimal	exponencial	Denominación
0.001	10^{-3}	milisegundo
0.000001	10^{-6}	microsegundos
0.000000001	10^{-9}	nanosegundos
	10^{-12}	picosegundos

Microsegundos, nanosegundos, o aun subdivisiones más pequeñas del segundo son muy difícil *medirlas* con un reloj mecánico. Estos intervalos de tiempo pueden ser *contados* con dispositivos electrónicos y pueden mostrarse en una forma útil o fácil para el ser humano. Por ejemplo, se puede pensar en un haz de cesio con 9 192 631 770 oscilaciones por segundo como un dispositivo estándar de frecuencia atómica que puede mandar un *tic* cada vez que se alcance ese número de oscilaciones. (Tiempo, t , y frecuencia, f , son cantidades recíprocas una de otra, es decir, $t = 1/f$. Debemos pensar que el tiempo, t , mide el intervalo entre cada evento, por ejemplo una ola de mar en medio segundo, y la frecuencia, f , es el conteo de cada evento por unidad de tiempo, es decir, dos olas por segundo.)

INSTRUMENTOS Y RELOJES ANTIGUOS

Desde la antigüedad se tenía necesidad de determinar el tiempo en forma precisa para conocer su lugar geográfico, por ejemplo, en la navegación. Navegantes primitivos notaron que la Estrella Polar *no* se

movía como otras en el cielo, y más aún, que aparecía a una elevación mayor y que esa distancia aumentaba más y más hasta el momento en que quedaba directamente sobre ellos cuando viajaban al norte hasta llegar al Polo Norte. Así, midiendo la elevación de esta estrella sobre el horizonte podían determinar su distancia del Polo Norte, o lo que es lo mismo la distancia al ecuador. El instrumento que usaban se llama *sextante*. Esta técnica proveía la determinación de la posición norte-sur o latitud. En la antigüedad también era importante determinar la posición este-oeste al navegar. La Tierra se ha dividido en líneas imaginarias de *longitud* constante o meridianos, en particular, 24 meridianos, cada uno separado del siguiente 15° , de manera que en su totalidad cubren los 360° de la superficie terrestre. Cada meridiano intersecta los polos norte y sur, y por convención el meridiano que pasa por Greenwich, Inglaterra, es el meridiano *cero*. El Sol viaja en el cielo (en forma aparente) de este a oeste con una rapidez de 15° por hora, y si alguien tenía un reloj que marcara la hora de Greenwich entonces podía determinar en qué longitud se encontraba, conociendo la posición del Sol (o sea la hora local) (figura II.2).

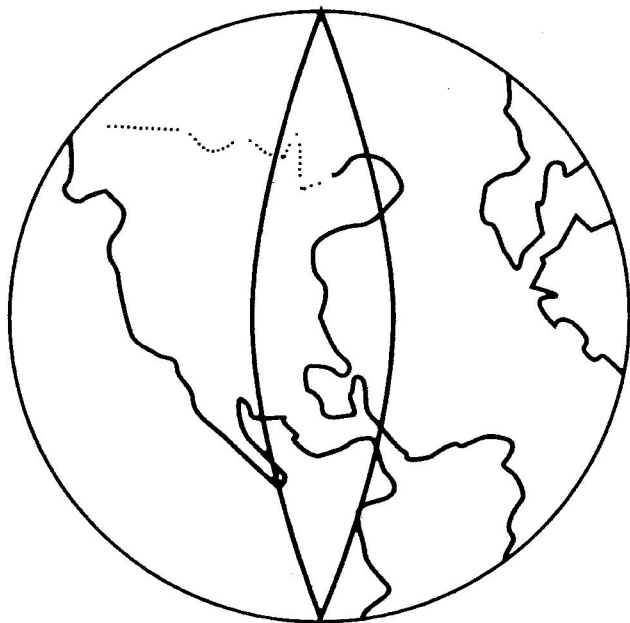


FIGURA II.2. Meridianos o líneas imaginarias que inician en el Polo Norte y terminan en el Polo Sur de la Tierra. Por convención existen 24 meridianos espaciados uno de otro en un ángulo de 15° , mismos que marcan cada hora del día hasta completar 24.

Entre los relojes antiguos podemos mencionar los relojes egipcios, que comprendían relojes de Sol y relojes de agua; estos últimos consistían de una olla llena de agua con un orificio en su parte inferior y marcas por cada hora en sus lados. Los griegos y los romanos continuaron la tradición con relojes de agua y arena, pero el peso de la arena forzaba a tener que usar muy poca y por lo tanto el reloj sólo marcaba un intervalo de tiempo corto. El primer reloj mecánico se construyó quizás en el siglo XIV en Europa (en las culturas mesoamericanas deben de haber existido también relojes, pero desgraciadamente no tenemos muchos vestigios de ellos. Recuerden la diferencia entre calendario y reloj). Este dispositivo se denominó el *rueda-de-corona*, pero se atrasaba casi 15 minutos cada día. Aun peor, dos dispositivos similares *no* conservaban la misma hora porque ello dependía del grado de fricción entre las diferentes partes del instrumento. Para contrarrestar ese defecto, Galileo pensó que el péndulo sería un buen aparato que podría usarse como reloj. El periodo pendular depende de la longitud del péndulo, pero *no* de la masa del hilo o de la masa del dispositivo que se colgará al final del hilo.

Pero Galileo nunca construyó un reloj-péndulo. Fue el holandés Christian Huygens el primero en lograrlo en 1656. Ese reloj se adelantaba o retrasaba sólo unos 10 segundos al día y esto era *mucho* mejor que el reloj rueda-de-corona. No obstante, había varios problemas; uno de ellos era que el hilo podía expandirse o contraerse de acuerdo con la temperatura y humedad en el ambiente y que el péndulo encontraba resistencia al movimiento con las moléculas del aire. Entonces se desarrolló lo que se conoce como el reloj *maestro-esclavo*, en el cual el reloj maestro controlaba propiamente la frecuencia o periodo (y por lo tanto la hora) y el reloj esclavo controlaba la transmisión de energía y, por lo tanto, su frecuencia. Este dispositivo variaba sólo algunos segundos cada cinco años.

Si se desea construir un mejor reloj es preciso conocer más acerca de cómo los componentes principales contribuyen a su ejecución. Necesitamos entender *qué es lo que hace que marque sus tic-tac*.

De acuerdo con lo que hemos hablado podemos identificar que cada reloj debe tener:

- un dispositivo que produzca un *fenómeno periódico* y a este dispositivo se le denomina *resonador*,
- se debe conservar ese movimiento periódico transfiriéndose energía de alguna forma al resonador. A la fuente de energía junto con el resonador se le denomina *oscilador*,

- y finalmente, se necesita un dispositivo que cuente, acumule y despliegue los tic-tac del oscilador (por ejemplo, las manecillas).

Q COMO FACTOR DE CALIDAD

Un resonador ideal sería aquél que dándole una energía inicial trabajase por siempre. Como se podrán imaginar, eso no es posible en la naturaleza debido a las diferentes fricciones. Sin embargo, algunos resonadores son mejores que otros y es útil tener una forma de juzgar qué tan buenos son en términos de cuántas oscilaciones pueden hacer al recibir un impacto inicial. Una forma de hacer esto es con el *factor de calidad* o Q . Q es el número de oscilaciones (por ejemplo de un péndulo) que hace un resonador hasta que su energía disminuye un porcentaje de su energía inicial dado un primer impulso. Un reloj típico puede tener $Q = 100$, mientras que un reloj científico puede tener $Q = 10\,000\,000$, por ejemplo. Una de las obvias ventajas de un resonador con Q alto es que, al proveerlo de energía, no necesitamos perturbar a menudo su frecuencia natural o frecuencia de resonancia. Asimismo, un resonador de Q alto no oscilará para nada a menos que oscile a su frecuencia de resonancia. Esta característica está íntimamente relacionada con la *exactitud* y *estabilidad* del resonador. Un resonador que sólo funciona cerca de su frecuencia natural es potencialmente más exacto que uno que funciona a varias frecuencias, y si esto sucede quizás no sea muy estable. Para entender mejor esta idea pensemos en una máquina que llena botellas de cerveza. Si analizamos la operación de la máquina quizás descubramos que cada botella se llena con casi la misma cantidad de cerveza, con un margen de error de quizás un mililitro. Diríamos que tiene buena *estabilidad*, pero muy mala *exactitud* (ya que no las llena al 100%). Por otro lado, si la máquina llena unas botellas en 110% y otras en 90% de tal forma que al final del día se usa la cantidad exacta de cerveza dado el número de botellas, entonces diríamos que la máquina tiene buena *exactitud* pero mala *estabilidad*.

Los mejores resonadores tienen buena *estabilidad* y buena *exactitud*. Sin embargo, existen algunos que tienen buena *estabilidad* pero mala *exactitud* y otros que tienen buena *exactitud* pero mala *estabilidad*.

LA CURVA DE RESONANCIA

Habíamos mencionado que un resonador con un Q alto, oscila, o tiene su mayor respuesta, a la frecuencia natural o frecuencia de resonancia.

Esto se puede apreciar con la siguiente figura en la cual se grafica la respuesta de un resonador (eje vertical), en términos de cuánta energía presenta, con respecto a la frecuencia (eje horizontal). Para entender mejor cómo construir esta gráfica pensemos en que deseamos graficar lo que sucede con un péndulo. Si empezamos por soltar el péndulo de una altura determinada, oscilará un cierto intervalo de tiempo y regresará a esa altura (se dice que es la frecuencia de resonancia); sin embargo, por causa de la fricción con el aire, el péndulo perderá energía y la altura disminuirá hasta que finalmente aquél no oscile. Si contamos las veces que el péndulo pasa por la posición vertical veremos que al principio pasa menor número de veces por unidad de tiempo (es decir, con menor frecuencia) y en cuanto disminuye la altura, aumenta el número de veces (o frecuencia) pero disminuye su energía. A esta gráfica se le conoce como la *curva de resonancia* (figura II.3).

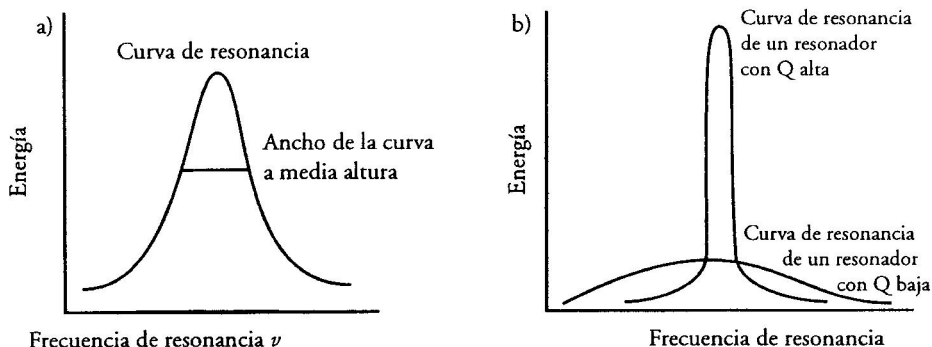


FIGURA II.3. a) Curva de resonancia, en donde en un eje se grafica la energía de un sistema y en otro eje la frecuencia. La curva mostrada es simétrica e indica que el valor máximo de la energía se encuentra a una frecuencia dada, f_0 . A esta frecuencia se le conoce como *frecuencia de resonancia* y al intervalo de frecuencias para el cual la energía es un medio de la energía máxima se le conoce como *ancho de la curva a media intensidad*. b) Curvas de resonancia para dos instrumentos o resonadores diferentes. El resonador con una curva cuyo ancho a intensidad media es angosto tiene un Q alto; por el contrario, el resonador con una curva cuyo ancho a media intensidad es muy ancho se dice que tiene un Q bajo.

Un valor muy grande de Q significa que la curva de resonancia tiene un ancho muy pequeño. El ancho de la curva medido cuando el valor de la energía es la mitad de la energía máxima está relacionado con el concepto de qué tanto tiempo necesita el reloj o dispositivo para perder su propiedad de producir oscilaciones o fenómenos periódicos (si se piensa en un péndulo, esta idea se refiere a cuánto tiempo tarda en detenerse después de un impulso inicial) (figura II.4).

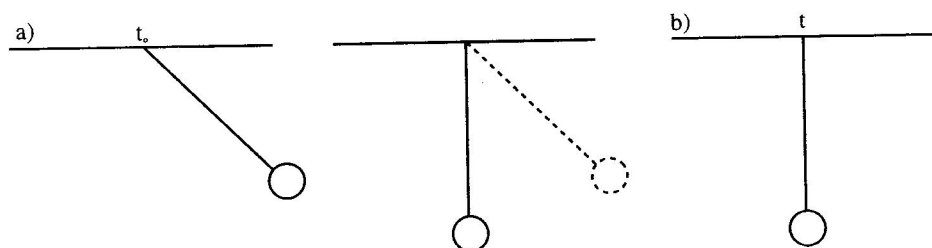


FIGURA II.4. a) Un péndulo se suelta desde la posición fuera de equilibrio a un tiempo t_0 . b) A un cierto tiempo t posterior, el péndulo se encuentra sin movimiento y en equilibrio, como consecuencia de las pérdidas de su energía, entre otras cosas por efectos de la fricción con el aire. Al intervalo de tiempo, $t - t_0$, se le conoce como el *tiempo de duración del resonador*.

Si el ancho de la curva de resonancia es muy pequeño significa que el tiempo de duración del resonador es muy grande, y esto implica un valor de Q muy alto. Es decir,

$$\text{ancho de la curva de resonancia} = \frac{1}{\text{tiempo de duración del resonador}}$$

CONSTRUYENDO MEJORES RELOJES

La parte esencial de un reloj actual es, como lo fue hace muchos años, algún dispositivo de vibración con un periodo tan uniforme como sea posible. Estos fenómenos periódicos involucran la conversión de energía: en el péndulo de la figura II.4 la energía cinética se transfiere a energía potencial y viceversa. Pero puede haber transferencia de energía entre átomos y campos electromagnéticos o entre varios tipos de energía potencial, química, eléctrica, etcétera.

CUADRO II.2. *Relojes y resonadores*

Tipo	Q (orden de magnitud)	Costo aproximado (dólares)
Arena o agua	1 000	(?) ~ 500
Vibrador	2 000	(?) ~ 500
Cuarzo	$10^5 \rightarrow 10^6$	~ 2 500
Amoniaco	$10^5 \rightarrow 10^6$	~ 2 500
Rubidio	$10^6 \rightarrow 10^7$	~ 7 500
Cesio	$10^7 \rightarrow 10^8$	~ 15 000
Máser de hidrógeno	10^9	~ 300 000

RELOJ DE CUARZO

El doctor Warren A. Harrison desarrolló en 1929 el reloj basado en el cristal de cuarzo; éste a su vez se basa en el efecto piezoeléctrico, es decir, el cristal vibra cuando se le aplica un voltaje eléctrico alterno (de cierta forma podríamos pensar que este reloj todavía es de tipo mecánico). Otra manera de ver esto es que al vibrar el cristal generará un voltaje oscilante. La frecuencia de resonancia del cristal depende de una manera complicada en *cómo* se ha cortado el cristal, el tamaño del cristal y la frecuencia de resonancia en particular que es excitada en el cristal por el voltaje alterno. Las vibraciones del cristal pueden ser desde algunos miles hasta millones de veces por segundo. (A una vibración de un ciclo por segundo se le conoce como un Hertz o 1 Hz. Esta nomenclatura es para rendir honor al científico Heinrich R. Hertz, quien trabajó en la teoría electromagnética durante el siglo XIX.) En general, entre más pequeño es el cristal, mayores serán las frecuencias de resonancia a las cuales vibrará. Así, cristales que vibran a frecuencias altas tienen un espesor quizás menor a 1 mm.

Los mejores cristales de cuarzo sólo se retrasan una milésima de segundo cada mes, o sea un segundo cada 80 años, mientras que relojes con cristales de menor calidad se retrasan regularmente un segundo cada 10 años. Existen dos principales razones por las cuales la frecuencia de resonancia de un cristal de cuarzo cambia: *a*) la frecuencia cambia con la temperatura, y *b*) la frecuencia cambia lentamente a causa de impurezas dentro del cristal y cambios internos del cristal ocasionados por el paso del tiempo.

RESONADOR DE AMONIACO

Este reloj o mejor dicho resonador se basa en la frecuencia natural de la molécula de amoníaco que consiste en tres átomos de hidrógeno y un átomo de nitrógeno, todos enlazados unos a otros formando una especie de pirámide con los tres átomos de hidrógeno formando la base, y el átomo de nitrógeno en la cúspide (figura II.5).

La molécula puede cambiar su energía de diferentes maneras; por ejemplo, *a*) el átomo de nitrógeno puede moverse desde lo alto de la pirámide a través del plano formado por los tres átomos de hidrógeno hasta formar una pirámide de cabeza y viceversa, *b*) la molécula puede girar alrededor de diferentes ejes de rotación, *c*) los átomos de hidrógeno y nitrógeno pueden vibrar con respecto a su posición de equilibrio, etc. Cada una de estas posibilidades corresponde a diferentes

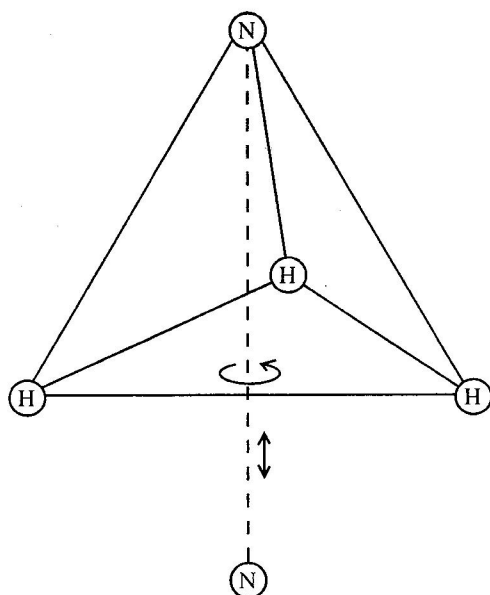


FIGURA II.5. Modelo esquemático de la molécula de amoníaco, NH_3 .

estados de energía. Si pensamos en que la energía es proporcional a la frecuencia de oscilación, la frecuencia que corresponde a la diferencia de energías cuando el átomo de nitrógeno está arriba y abajo es de $\nu = 23\,870\,000\,000\text{ Hz}$; o usando notación de potencias de diez, $\nu = 23.870 \times 10^9\text{ Hz}$ o $\nu = 23.87\text{ GHz}$, en donde 1 GHz (simboliza un gigahertz) es igual 10^9 Hz .

Aun cuando el ancho de la curva de resonancia, medida a media altura, es muy angosta existen algunos problemas con este resonador. Uno de ellos es la colisión de moléculas unas con otras y la colisión de moléculas con las paredes del contenedor, las cuales producen aceleraciones o fuerzas que alteran la frecuencia de resonancia. Otro problema es el efecto Doppler originado por el movimiento de las moléculas, el cual distorsiona la frecuencia de resonancia.

EL RESONADOR DE CESIO

La frecuencia natural de vibración es una propiedad del átomo de cesio y corresponde a un valor de $\nu = 9\,192\,631\,770\text{ Hz}$. El cesio es un metal a temperatura ambiente y está formado por un núcleo rodeado por

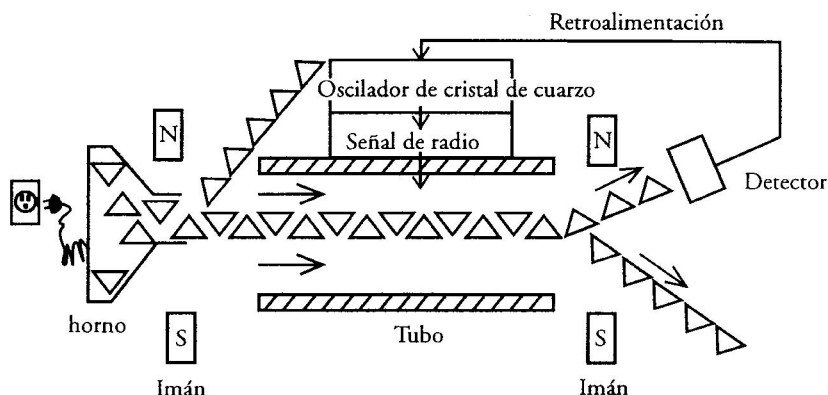


FIGURA II.6. Dibujo esquemático del resonador de cesio.

una nube de electrones de los cuales el electrón más alejado está orbitando por sí solo. Este electrón gira sobre su eje y con esto produce un campo magnético. Se puede decir que el núcleo gira también sobre su eje produciendo un campo magnético. El eje de rotación del electrón no es paralelo al eje electromagnético. Si los ejes electromagnéticos del electrón y del núcleo están alineados, el átomo tiene cierto estado de energía; si los ejes son antiparalelos entonces el átomo tiene otro estado de energía. La diferencia de energía entre estos dos estados nos da la frecuencia característica. Algunos resonadores tienen un Q de más de 100 millones que se usan como *estándares* o de referencia, otros más sencillos tienen un Q de 10 millones. Los resonadores que se usan como estándares sólo difieren en un segundo cada 370 000 años. La figura II.6 ilustra la operación de un resonador de cesio. Del lado izquierdo se tiene un pequeño horno que calienta los átomos de cesio hasta que el gas escapa a través de un pequeño orificio que se conecta a un tubo largo en vacío. Los átomos viajan a lo largo del tubo (evitando hasta cierto punto las colisiones). Al viajar, los átomos de cesio pasan a través de un filtro o un imán o campo magnético que separa los átomos en dos haces de acuerdo a si el electrón tiene alineado o no su eje electromagnético con el del núcleo. Sólo una clase se deja pasar y la otra se desvía hacia otra dirección fuera del tubo. El haz seleccionado, para viajar a lo largo del tubo, pasa a través de una sección donde los átomos están inmersos a una señal en ondas de radio a una frecuencia muy cercana a $\nu = 9\,192\,631\,770$ Hz. Si la señal de radio es exactamente la frecuencia de resonancia de los átomos de cesio, el último electrón cambiará la orientación del eje electromagnético con respecto al del núcleo y por lo tanto mostrará otro estado de energía.

Los átomos viajan al final del tubo a través de otro filtro magnético que sólo deja pasar aquellos átomos que sí han cambiado su energía. El detector final produce una señal proporcional al número de átomos y esta señal alimenta un sistema de control de la fuente de señales de radiofrecuencias a través de un oscilador de cristal de tal forma que se maximice el número de átomos que lleguen al detector, es decir, se trata de que la señal de radio sea lo más cercana a la frecuencia del átomo de cesio.

EL RESONADOR DE RUBIDIO

Este dispositivo se basa en la frecuencia de resonancia particular de los átomos de rubidio. El gas se mantiene a muy baja presión en un contenedor especial. Los átomos, como los cristales, tienen más de una frecuencia de resonancia, siendo una de ellas la frecuencia excitada por un haz de luz y otra por una señal de radio a una frecuencia de microondas. La figura II.7 ilustra un oscilador de rubidio. Se tiene una fuente de luz que radia un bulbo de gas de rubidio y los átomos que se encuentren en el estado de energía correcto absorberán esa radiación. La señal de radio en microondas, al estar sintonizada a la frecuencia de resonancia de los átomos de rubidio ayuda a un mayor número de átomos a estar en el estado correcto para absorber la energía del haz de luz, y mientras más átomos absorban la energía del haz de luz, mejor

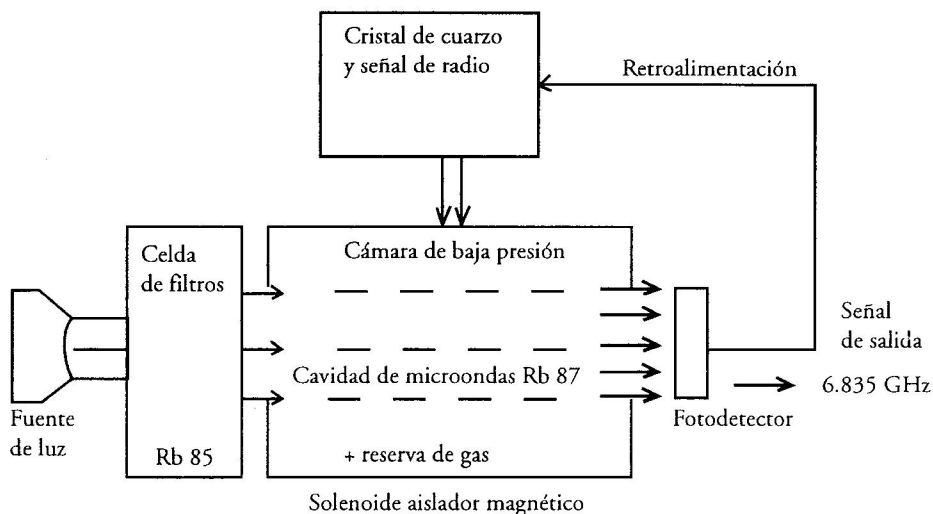


FIGURA II.7. Diagrama esquemático de un resonador de rubidio.

sintonizada estará la señal de radio con la frecuencia de resonancia de rubidio. Al final se detecta la cantidad de luz (que es menor que la original a causa de que parte de ésta ha sido absorbida por los átomos de rubidio) y se usa para generar una señal de control para el generador de señales de microondas. Los resonadores de rubidio tienen un Q de aproximadamente 10 millones y sólo difieren en un segundo cada 300 años; aunque de menor calidad que los resonadores de cesio, sin embargo, son importantes porque su costo es menor.

EL RESONADOR MÁSER DE HIDRÓGENO

En los tres resonadores atómicos mencionados, amoníaco, cesio y rubidio, se observa la frecuencia de resonancia en forma *indirecta*; por ejemplo, se determina el número de átomos de cesio que llegan al detector. En el caso del máser de hidrógeno se detecta *directamente* la frecuencia de resonancia. El científico que desarrolló el máser es Charles H. Townes, actual profesor e investigador de la Universidad de California en Berkeley, California. La palabra máser es un acrónimo de *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, es decir, una amplificación de señales de microondas producida por la emisión estimulada de radiación. En el caso del máser de hidrógeno el agente resonador es el gas de hidrógeno que tiene una frecuencia de resonancia de $\nu = 1\,420\,405\,752$ Hz. Al igual que el tubo del haz de cesio, el gas hidrógeno pasa por un filtro magnético que permite viajar sólo a aquellos átomos que estén en el estado de energía correcto. Esos átomos entran en un tubo de almacenamiento hecho de cristal de cuarzo de tan solo unos cuantos centímetros de diámetro y recubierto de un material similar al usado para los utensilios de cocina. Por razones no muy claras este recubrimiento reduce los efectos perturbadores de frecuencia de resonancia causada por las colisiones de los átomos de hidrógeno al chocar con las paredes. Los átomos permanecen en el tubo alrededor de un segundo y por lo tanto su tiempo de decaimiento efectivo es de alrededor de 1 segundo, comparado con 0.04 s para el tubo de cesio, y esto a su vez se traduce en tener un Q de aproximadamente 10 000 millones, es decir, $Q = 10^{10}$. Si el tubo contenedor tiene suficientes átomos de hidrógeno en el estado de energía correcto ocurrirá una autooscilación. De acuerdo con las leyes de la mecánica cuántica, un átomo que se encuentre en un estado de energía superior, *espontáneamente* pasará a un estado de energía menor y emitirá un fotón de radiación a la frecuencia de resonancia. Si este fotón es absorbido por otro átomo que se

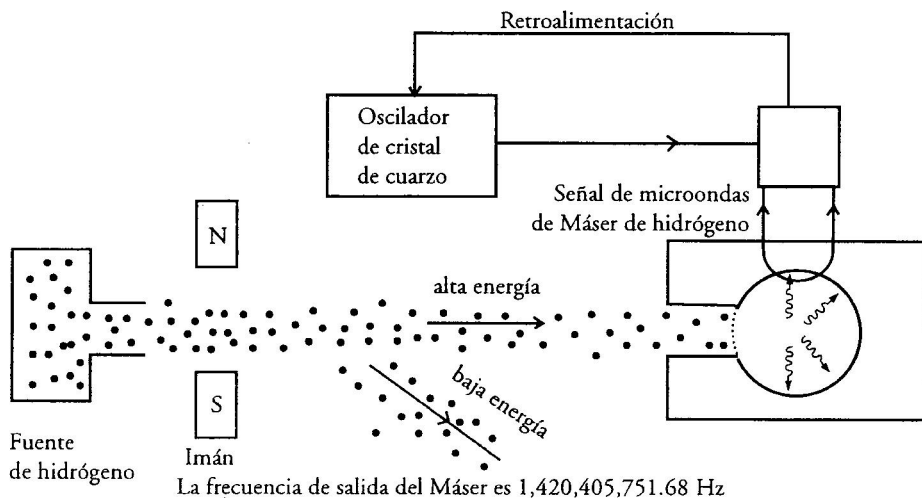


FIGURA II.8. Resonador máser de hidrógeno.

encuentra en el mismo estado superior de energía, el átomo es *estimulado* para pasar a un estado menor de energía y por lo tanto para emitir otro fotón de la misma frecuencia. Este proceso es de notarse porque esta estimulación está en sincronía con la radiación que lo produce y además produce una señal de radio, en el rango de las microondas, que puede detectarse con un receptor adecuado. Esta señal a su vez se usa para regular la frecuencia del oscilador de cristal a la frecuencia de resonancia de los átomos de hidrógeno.

Este resonador difiere aproximadamente en 1 segundo cada 400 000 años. Gracias a sus propiedades de estabilidad y exactitud, este tipo de resonador se instala en cada radiotelescopio de observaciones con la técnica de radiointerferometría de base muy larga, con lo cual se asegura que las observaciones serán simultáneas y que cada radiobservatorio tenga un reloj que marque la misma hora y que mida el intervalo de segundo equivalente.

ESCALAS DE TIEMPO

Finalmente nos gustaría hablar un poco de las escalas del tiempo como las conocemos usualmente. El año, el mes y el día son unidades naturales del tiempo derivadas de tres diferentes ciclos astronómicos:

- el año, o año solar, es el periodo que comprende una revolución completa de la Tierra alrededor del Sol,

- el mes es el tiempo entre dos lunas nuevas sucesivas, y
- el día es el intervalo entre el paso del Sol por el zenit dos veces consecutivas.

Sin embargo, mientras el hombre usaba métodos más elaborados notó que no había un número entero de días en el año. Los egipcios fueron los primeros en reconocer que el año solar era de casi 365 días y que aún así se requería un pequeño ajuste, de no ser así las estaciones del año se iban deslizando. Llegaron a la conclusión de que el ajuste debería ser algo así como un día cada cuatro años. Sin embargo, no fue sino hasta el año 46 a.C. cuando Julio César instituyó el calendario de 365 días por año agregando un día cada 4 años. Se observó que esta corrección *sobrecorregía* el calendario de tal forma que después de mil y pico de años ésta sobrecorrección era ya de 6 días. De ahí que en 1582 el papa Gregorio XIII modificó el calendario y para corregirlo ordenó que el día 4 de octubre fuese 15 de octubre y aquellos años que empiezan en siglos no divisibles entre 400 no serían años bisiestos.

- *El día solar.* Como su nombre lo indica es el intervalo de tiempo entre dos mediodías consecutivos, pero se notó que la hora variaba hasta 15 minutos entre un día promedio en noviembre y un día promedio en febrero. Algunas de las razones para esto son:
 - la Tierra no viaja alrededor del Sol en una órbita circular sino en una órbita elíptica. Cuando la Tierra está más cerca del Sol, es decir en el invierno del hemisferio norte, viaja más rápido en su órbita que cuando está más lejos del Sol, es decir en el verano,
 - el eje de rotación de la Tierra está inclinado $23\frac{1}{2}^{\circ}$ con respecto al plano que contiene la órbita alrededor del Sol, y, superpuesto, gira en un periodo de 26 000 años alrededor de esa posición.
- *El día solar medio.* Es simplemente la longitud promedio de los días solares en el año.
- *El día sideral.* Éste es el día definido como el intervalo de tiempo que transcurre durante el paso consecutivo de una estrella por el meridiano, es decir, por encima de nosotros si la estrella pasa por el zenit. ¿Es el tiempo sideral el mismo que el tiempo solar? La respuesta es no. Se puede apreciar que la estrella aparece sobre el meridiano cada día más temprano debido a que además de girar sobre su eje, la Tierra también viaja alrededor del Sol. El efecto neto es que el día solar medio es aproximadamente 4 minutos más largo que el que se determina usando estrellas. Contrario al día solar medio, el día sideral *no* cambia su longitud a lo largo del año, porque

las estrellas están más lejos, y la inclinación del eje de rotación de la Tierra y la traslación alrededor del Sol no son tan importantes.

- *Tiempo universal*. La rotación de la Tierra no es uniforme, algunas manifestaciones son:

- la Tierra rota cada vez más lento, de tal forma que el día es ahora $\simeq 16$ milisegundos más largo que hace 1 000 años,
- las posiciones de los polos Norte y Sur varían año tras año y esto puede producir una discrepancia de hasta 30 milisegundos,
- existen fluctuaciones regulares e irregulares en la inclinación de la Tierra y en su rotación, que introducen hasta unos milisegundos por año.

Todos estos efectos contribuyen para que la Tierra sea un reloj irregular, lo cual ha dado lugar al desarrollo o definición de tres escalas de tiempo que se denominan en forma genérica *tiempo universal*:

- UT0 es la escala de tiempo generada por el día solar medio. Así es como UT0 toma en cuenta la inclinación del eje de rotación de la Tierra y el movimiento de traslación alrededor del Sol en una órbita elíptica,
 - UT1 es UT0 tomando en cuenta el movimiento de las posiciones de los polos (nutación),
 - UT2 es UT1 tomando en cuenta la pequeña desaceleración y aceleración de la Tierra en las diferentes estaciones del año,
 - UTC es UT2 cuando se basa en tiempo atómico, y entonces se denomina *tiempo universal coordinado*.
- *Tiempo efemérico*. Desde 1956 se decidió que el tiempo debía ser medido por eventos astronómicos y no sólo por la rotación de la Tierra. A este tiempo se le conoce como *tiempo efemérico*, ET. Este tiempo tiene la gran ventaja de que es uniforme, pero tiene la gran desventaja de que no es tan accesible, es decir, se necesita hacer mediciones por un largo periodo de tiempo.

Para la definición moderna de segundo, véase el cuadro II.3

CUADRO II.3. *Definiciones modernas de segundo*

<i>Antes de 1956</i>	<i>Nombre</i>
Un segundo = $\frac{\text{día solar promedio}}{86\,400}$	Segundo solar promedio
<i>Entre 1956 y 1967</i>	
Un segundo = $\frac{\text{Año promedio solar de 1900}}{31\,556\,925.9747}$	Segundo efemérico
<i>Desde 1967</i>	
Un segundo = 9 192 631 770 oscilaciones del átomo de cesio	Segundo atómico

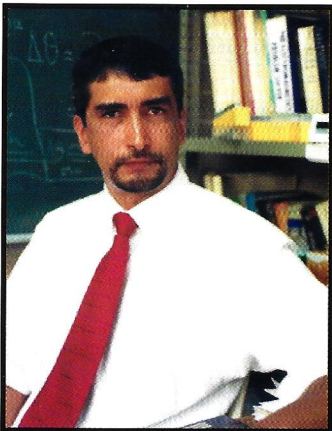
BIBLIOGRAFÍA

- Allen, C. W. (1973), *Astrophysical Quantities*, The Athlone Press, Universidad de Londres, 3a. edición.
- Binney, J. y S., Tremaine (1987), *Galactic Dynamics*, Princeton University Press, Nueva Jersey.
- Harwith, M. (1973), *Astrophysical Concepts*, John Wiley & Sons, Nueva York.
- Hines, C. O., I. Paghis, T. R. Hartz y J. A. Fejer (1965), *Physics of the Earth's Upper Atmosphere*, Prentice Hall, Inc., Nueva Jersey.
- Hubble, E. (1982), *The Realm of the Nebulae*, Yale University Press y The Alpine Press, Stoughton, Massachusetts.
- Jespersen, J. y J. Fitz-Randolph (1982), *From Sundials to Atomic Clocks*, Dover Publications, Nueva York.
- Kraus, J. D. (1966), *Radio Astronomy*, McGraw Hill Co., Nueva York.
- Léna, P. (1988), *Observational Astrophysics*, Springer Verlag, Nueva York.
- Mihalas D. y J. Binney (1968), *Galactic Astronomy*, W. H. Freeman and Co., San Francisco, California.
- Shu, F. H. (1982), *The Physical Universe: An Introduction to Astronomy*, University Science Books, California.
- Vessot, R. F. C. (1976), en *Methods of Experimental Physics*, vol. 12, parte C, comp. M. L. Meeks, Academic Press, Nueva York.
- Weinberg, S. (1972), *Gravitation and Cosmology*, John Wiley, Nueva York.
- Weinberg, S. (1977), *The First Three Minutes*, Basic Books, Inc., Nueva York.

LECTURAS RECOMENDADAS PARA EL LECTOR AVANZADO

Osciladores, ondas

- Bekefi, G. y A. H. Barrett (1977), *Electromagnetics, vibrations, waves, and radiation*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.



El doctor José Antonio García Barreto cursó su licenciatura en ingeniería eléctrica en la Universidad de la Américas y el doctorado en física, con especialidad en radioastronomía, en el Instituto Tecnológico de Massachusetts. En el nivel de posgrado ha llevado a cabo cursos sobre matemáticas avanzadas, estructura galáctica y dinámica estelar, procesos radiativos y radioastronomía. Ha publicado varios trabajos de su campo de investigación en revistas especializadas y ha presentado otros tantos en congresos y simposios nacionales e internacionales.

Actualmente es investigador titular del Instituto de Astronomía de la UNAM, del que ha sido representante ante la Secretaría de Relaciones Exteriores, la Facultad de Ciencias de la propia Universidad y el Departamento de Educación Media Superior del Estado de México.

Entre las distinciones que ha recibido destacan las becas para científicos distinguidos de la Fundación Alexander von Humboldt y de la Sociedad Max Planck, ambas de la ex República Federal Alemana.

Es miembro de la Sociedad Norteamericana de Astronomía (AAS), del Sistema Nacional de Investigadores (SNI), de la Unión Astronómica Internacional (UAI) y de la Academia Mexicana de Ciencias (AMC).