

Introducción

Una onda es una perturbación que avanza o que se propaga en un medio material o incluso en el vacío. A pesar de la naturaleza diversa de las perturbaciones que pueden originarlas, todas las ondas tienen un comportamiento semejante. El sonido es un tipo de onda que se propaga únicamente en presencia de un medio que haga de soporte de la perturbación. Los conceptos generales sobre ondas sirven para describir el sonido, pero, inversamente, los fenómenos sonoros permiten comprender mejor algunas de las características del comportamiento ondulatorio.

Los jugadores de dominó, como distracción complementaria, colocan las fichas del juego en posición vertical, una al lado de otra, a una distancia inferior a la longitud de las fichas formando una hilera. Cuando se le da un impulso a la ficha situada en uno de los extremos se inicia una acción en cadena; cada ficha transmite a su vecina el impulso recibido, el cual se propaga desde un extremo a otro a lo largo de toda la hilera. En términos físicos podría decirse que una onda se ha propagado a través de las fichas de dominó. La idea de onda corresponde en la física a la de una perturbación local de cualquier naturaleza que avanza o se propaga a través de un medio material o incluso en el vacío.

Algunas clases de ondas precisan para propagarse de la existencia de un medio material que, al igual que las fichas de dominó, haga el papel de soporte de la perturbación; se denominan genéricamente ondas mecánicas. El sonido, las ondas que se forman en la superficie del agua, las ondas en muelles o en cuerdas, son algunos ejemplos de ondas mecánicas y corresponden a compresiones, deformaciones y, en general, a perturbaciones del medio que se propagan a través suyo. Sin embargo, existen ondas que pueden propagarse aun en ausencia de medio material, es decir, en el vacío. Son las ondas electromagnéticas o campos electromagnéticos viajeros; a esta segunda categoría pertenecen las ondas luminosas.

Independientemente de esta diferenciación, existen ciertas características que son comunes a todas las ondas, cualquiera que sea su naturaleza, y que en conjunto definen el llamado comportamiento ondulatorio, esto es, una serie de fenómenos típicos que diferencian dicho comportamiento del comportamiento propio de los corpúsculos o partículas.

Movimiento ondulatorio

Proceso por el que se propaga energía de un lugar a otro sin transferencia de materia, mediante ondas mecánicas o electromagnéticas. En cualquier punto de la trayectoria de propagación se produce un desplazamiento periódico, u oscilación, alrededor de una posición de equilibrio. Puede ser una oscilación de moléculas de aire, como en el caso del sonido que viaja por la atmósfera, de moléculas de agua (como en las olas que se forman en la superficie del mar) o de porciones de una cuerda o un resorte. En todos estos casos, las partículas oscilan en torno a su posición de equilibrio y sólo la energía avanza de forma continua. Estas ondas se denominan mecánicas porque la energía se transmite a través de un medio material, sin ningún movimiento global del propio medio. Las únicas ondas que no requieren un medio material para su propagación son las ondas electromagnéticas; en ese caso las oscilaciones corresponden a variaciones en la intensidad de campos magnéticos y eléctricos.

Tipos de movimiento ondulatorio

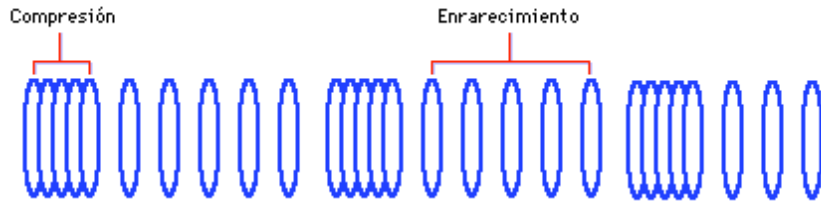


Figura 1: onda longitudinal



Figura 2: onda transversal

Ilustración de Microsoft

Las ondas son una perturbación periódica del medio en que se mueven. En las ondas longitudinales, el medio se desplaza en la dirección de propagación. Por ejemplo, el aire se comprime y expande (figura 1) en la misma dirección en que avanza el sonido. En las ondas transversales, el medio se desplaza en ángulo recto a la dirección de propagación. Por ejemplo, las ondas en un estanque (figura 2) avanzan horizontalmente, pero el agua se desplaza verticalmente.

Los terremotos generan ondas de los dos tipos, que avanzan a distintas velocidades y con distintas trayectorias. Estas diferencias permiten determinar el epicentro del sismo. Las partículas atómicas y la luz pueden describirse mediante ondas de probabilidad, que en ciertos aspectos se comportan como las ondas de un estanque.

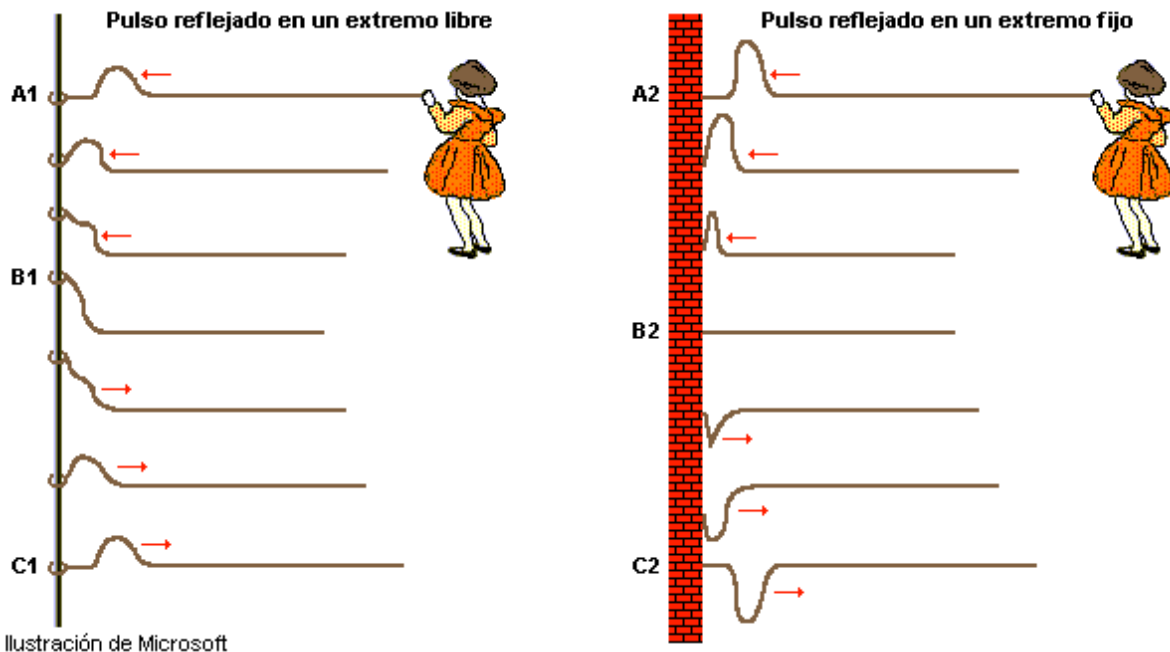


Ilustración de Microsoft

Reflexión de pulsos ondulatorios

Sacudiendo una cuerda rápidamente se genera un pulso ondulatorio que avanza por la cuerda hacia la izquierda (A). Si el extremo de la cuerda puede moverse libremente, el pulso vuelve por la cuerda por el mismo lado (C1). Si la cuerda está atada a la pared, el pulso vuelve por la cuerda por el lado opuesto (C2). Si el extremo está libre, el pulso tendrá el doble de la amplitud original en el punto de reflexión (B1); si el extremo está fijo, la amplitud del pulso en dicho punto será nula (B2).

Oscilación

En física, química e ingeniería, movimiento repetido de un lado a otro en torno a una posición central, o posición de equilibrio. El recorrido que consiste en ir desde una posición extrema a la otra y volver a la primera, pasando dos veces por la posición central, se denomina ciclo. El número de ciclos por segundo, o hercios (Hz), se conoce como frecuencia de la oscilación.

Cuando se pone en movimiento un péndulo o se puntea la cuerda de una guitarra, el péndulo y la cuerda acaban deteniéndose si no actúan sobre ellos otras fuerzas. La fuerza que hace que dejen de oscilar se denomina amortiguadora. Con frecuencia, estas fuerzas son fuerzas de rozamiento, pero en un sistema oscilante pueden existir otras fuerzas amortiguadoras, por ejemplo eléctricas o magnéticas.

Frecuencia natural

Cualquier objeto oscilante tiene una 'frecuencia natural', que es la frecuencia con la que tiende a vibrar si no se le perturba. Por ejemplo, la frecuencia natural de un péndulo de 1 m de longitud es de 0,5 Hz, lo que significa que el péndulo va y vuelve una vez cada 2 segundos. Si se le da un ligero impulso al péndulo cada 2 segundos, la amplitud de la oscilación aumenta gradualmente hasta hacerse muy grande. El fenómeno por el que una fuerza relativamente pequeña aplicada de forma repetida hace que la amplitud de un sistema oscilante se haga muy grande se denomina resonancia. Muchos problemas graves de vibración en ingeniería son debidos a la resonancia. Por ejemplo, si la frecuencia natural de la carrocería de un automóvil es la misma que el ritmo del motor cuando gira a una velocidad determinada, la carrocería puede empezar a vibrar o a dar fuertes sacudidas. Esta vibración puede evitarse al montar el motor sobre un material amortiguador, por ejemplo hule o goma, para aislarlo de la carrocería.

Flameo

Un tipo peligroso de vibración es la oscilación repentina y violenta conocida como flameo. Este fenómeno se produce sobre todo en las superficies de control de los aviones, pero también ocurre en los cables eléctricos cubiertos de escarcha cuando la velocidad del viento es elevada. Uno de los casos de flameo más espectaculares provocó en 1940 el hundimiento de un puente en Tacoma, Estados Unidos. La causa fue un viento huracanado cuya velocidad potenció la vibración del puente.

En el flameo, la amplitud de vibración de una estructura puede aumentar tan rápidamente como para que ésta se desintegre casi de forma instantánea. Por eso, impedir el flameo es muy importante a la hora de diseñar puentes y aviones. En el caso de los aviones, el análisis de flameo suele complementarse con pruebas realizadas con una maqueta del avión en un túnel aerodinámico.

Sonido

fenómeno físico que estimula el sentido del oído. En los seres humanos, esto ocurre siempre que una vibración con frecuencia comprendida entre unos 15 y 20.000 hercios llega al oído interno. El hercio (Hz) es una unidad de frecuencia que corresponde a un ciclo por segundo. Estas vibraciones llegan al oído interno transmitidas a través del aire, y a veces se restringe el término 'sonido' a la transmisión en este medio. Sin embargo, en la física moderna se suele extender el término a vibraciones similares en medios líquidos o sólidos. Los sonidos con frecuencias superiores a unos 20.000 Hz se denominan ultrasonidos.

Características físicas

Cualquier sonido sencillo, como una nota musical, puede describirse en su totalidad especificando tres características de su percepción: el tono, la intensidad y el timbre. Estas características corresponden exactamente a tres características físicas: la frecuencia, la amplitud y la composición armónica o forma de onda. El ruido es un sonido complejo, una mezcla de diferentes frecuencias o notas sin relación armónica.

Las ondas sonoras constituyen un tipo de ondas mecánicas que tienen la virtud de estimular el oído humano y generar la sensación sonora. En el estudio del sonido se deben distinguir los aspectos físicos de los aspectos fisiológicos relacionados con la audición. Desde un punto de vista físico el sonido comparte todas las propiedades características del comportamiento ondulatorio, por lo que puede ser descrito utilizando los conceptos sobre ondas. A su vez el estudio del sonido sirve para mejorar la comprensión de algunos fenómenos típicos de las ondas. Desde un punto de vista fisiológico sólo existe sonido cuando un oído es capaz de percibirlo.

El sonido y su propagación

Las ondas que se propagan a lo largo de un muelle como consecuencia de una compresión longitudinal del mismo constituyen un modelo de ondas mecánicas que se asemeja bastante a la forma en la que el sonido se genera y se propaga. Las ondas sonoras se producen también como consecuencia de una compresión del medio a lo largo de la dirección de propagación. Son, por tanto, ondas longitudinales.

Si un globo se conecta a un pistón capaz de realizar un movimiento alternativo mediante el cual inyecta aire al globo y lo toma de nuevo, aquél sufrirá una secuencia de operaciones de inflado y desinflado, con lo cual la presión del aire contenido dentro del globo aumentará y disminuirá sucesivamente. Esta serie de compresiones y encarecimientos alternativos llevan consigo una aportación de energía, a intervalos, del foco al medio y generan ondas sonoras. La campana de un timbre vibra al ser golpeada por su correspondiente martillo, lo que da lugar a compresiones sucesivas del medio que la rodea, las cuales se propagan en forma de ondas. Un diapasón, la cuerda de una guitarra o la de un violín producen sonido según un mecanismo análogo.

En todo tipo de ondas mecánicas el medio juega un papel esencial en la propagación de la perturbación, hasta el punto de que en ausencia de medio material, la vibración, al no tener por donde propagarse, no da lugar a la formación de la onda correspondiente. La velocidad de propagación del sonido depende de las características del medio. En el caso de medios gaseosos, como el aire, las vibraciones son transmitidas de un punto a otro a través de choques entre las partículas que constituyen el gas, de ahí que cuanto mayor sea la densidad de éste, mayor será la velocidad de la onda sonora correspondiente. En los medios sólidos son las fuerzas que unen entre sí las partículas constitutivas del cuerpo las que se encargan de propagar la perturbación de un punto a otro. Este procedimiento más directo explica que la velocidad del sonido sea mayor en los sólidos que en los gases.

Sonido físico y sensación sonora

No todas las ondas sonoras pueden ser percibidas por el oído humano, el cual es sensible únicamente a aquellas cuya frecuencia está comprendida entre los 20 y los 20 000 Hz. En el aire dichos valores extremos corresponden a longitudes de onda que van desde 16 metros hasta 1,6 centímetros respectivamente. En general se trata de ondas de pequeña amplitud.

Cuando una onda sonora de tales características alcanza la membrana sensible del tímpano, produce en él vibraciones que son transmitidas por la cadena de huesillos hasta la base de otra membrana situada en la llamada ventana oval, ventana localizada en la cóclea o caracol. El hecho de que la ventana oval sea de 20 a 30 veces más pequeña que el tímpano da lugar a una amplificación que llega a aumentar entre 40 y 90 veces la presión de la onda que alcanza al tímpano. Esta onda de presión se propaga dentro del caracol a través de un

líquido viscoso hasta alcanzar otra membrana conectada a un sistema de fibras fijas por sus extremos a modo de cuerdas de arpa, cuyas deformaciones elásticas estimulan las terminaciones de los nervios auditivos. Las señales de naturaleza eléctrica generadas de este modo son enviadas al cerebro y se convierten en sensación sonora. Mediante este proceso el sonido físico es convertido en sonido fisiológico.

Tipos de ondas

Las ondas se clasifican según la dirección de los desplazamientos de las partículas en relación a la dirección del movimiento de la propia onda. Si la vibración es paralela a la dirección de propagación de la onda, la onda se denomina longitudinal. Una onda longitudinal siempre es mecánica y se debe a las sucesivas compresiones (estados de máxima densidad y presión) y enrarecimientos (estados de mínima densidad y presión) del medio. Las ondas sonoras son un ejemplo típico de esta forma de movimiento ondulatorio. Otro tipo de onda es la onda transversal, en la que las vibraciones son perpendiculares a la dirección de propagación de la onda. Las ondas transversales pueden ser mecánicas, como las ondas que se propagan a lo largo de una cuerda tensa cuando se produce una perturbación en uno de sus extremos, o electromagnéticas, como la luz, los rayos X o las ondas de radio. En esos casos, las direcciones de los campos eléctrico y magnético son perpendiculares a la dirección de propagación. Algunos movimientos ondulatorios mecánicos, como las olas superficiales de los líquidos, son combinaciones de movimientos longitudinales y transversales, con lo que las partículas de líquido se mueven de forma circular.

En una onda transversal, la longitud de onda es la distancia entre dos crestas o valles sucesivos. En una onda longitudinal, corresponde a la distancia entre dos compresiones o entre dos enrarecimientos sucesivos. La frecuencia de una onda es el número de vibraciones por segundo. La velocidad de propagación de la onda es igual a su longitud de onda multiplicada por su frecuencia. En el caso de una onda mecánica, su amplitud es el máximo desplazamiento de las partículas que vibran. En una onda electromagnética, su amplitud es la intensidad máxima del campo eléctrico o del campo magnético.

En relación con su ámbito de propagación las ondas pueden clasificarse en:

Monodimensionales: Son aquellas que, como las ondas en los muelles o en las cuerdas, se propagan a lo largo de una sola dirección del espacio.

Bidimensionales: Se propagan en cualquiera de las direcciones de un plano de una superficie. Se denominan también ondas superficiales y a este grupo pertenecen las ondas que se producen en la superficie de un lago cuando se deja caer una piedra sobre él.

Atendiendo a la periodicidad de la perturbación local que las origina, las ondas se clasifican en:

Periódicas: Corresponden a la propagación de perturbaciones de características periódicas, como vibraciones u oscilaciones que suponen variaciones repetitivas de alguna propiedad. Así, en una cuerda unida por uno de sus extremos a un vibrador se propagará una onda periódica.

No periódicas: La perturbación que las origina se da aisladamente y en el caso de que se repita, las perturbaciones sucesivas tienen características diferentes. Las ondas aisladas, como en el caso de las fichas de dominó, se denominan también pulsos.

Según que la dirección de propagación coincida o no con la dirección en la que se produce la perturbación, las ondas pueden ser:

Longitudinales: El movimiento local del medio alcanzado por la perturbación se efectúa en la dirección de avance de la onda. Un muelle que se comprime da lugar a una onda longitudinal.

Transversales: La perturbación del medio se lleva a cabo en dirección perpendicular a la de propagación. En las ondas producidas en la superficie del agua las partículas vibran de arriba a abajo y viceversa, mientras que el movimiento ondulatorio progresa en el plano perpendicular. Lo mismo sucede en el caso de una cuerda; cada punto vibra en vertical, pero la perturbación avanza según la dirección de la línea horizontal. Ambas son ondas transversales.

Ondas gravitacionales

perturbaciones en el espacio-tiempo que, según se cree, se difunden a la velocidad de la luz desde los lugares donde se acelera rápidamente una masa. Entre las posibles fuentes de estas ondas están las siguientes: las explosiones violentas de supernovas, que van acompañadas del colapso de los núcleos estelares y la posterior formación de estrellas de neutrones o agujeros negros; la interacción de agujeros negros; los púlsares (estrellas de neutrones en rotación), y los sistemas binarios de estrellas de neutrones, cuando sus dos componentes se funden en uno solo y mueren.

La existencia de ondas gravitacionales fue prevista en la teoría de la relatividad general de Einstein, pero aún no se han detectado estas ondas de forma directa. Sin embargo, se han encontrado pruebas indirectas de su existencia. Las ondas gravitacionales hipotéticas se llevarían energía del sistema donde se originan. Se han observado pérdidas de energía, del orden de magnitud previsto, en el 'desgaste' de las órbitas de los dos componentes de PSR 1913+16; este objeto celeste se compone de dos estrellas de neutrones que giran una en torno a la otra. En 1993 se concedió el Premio Nóbel de Física a los estadounidenses Russell A. Hulse y Joseph H. Taylor, de la Universidad de Princeton, por este trabajo y por el descubrimiento de púlsares binarios.

Una observación más directa de las ondas gravitacionales proporcionaría una confirmación más profunda y detallada de la relatividad, y también abriría un nuevo campo en astronomía al proporcionar nueva información sobre el colapso de las estrellas, la interacción de los agujeros negros y la velocidad de expansión del Universo. Sin embargo, la detección de estas ondas es uno de los mayores retos de la actual física experimental. La detección se basa en observar tensiones en el espacio, cambios extremadamente pequeños en la distancia entre objetos materiales provocados por las ondas. En la mayoría de las situaciones, estos movimientos son mayores cuando las distancias totales también son mayores. El análisis teórico sugiere que los detectores tendrían que ser sensibles a tensiones del orden de 10^{-21} a 10^{-22} . Esta relación equivale a un cambio de aproximadamente el diámetro de un átomo, o menos, en la distancia de la Tierra al Sol. Esta variación puede producirse en una escala temporal que va de milisegundos a horas, según el tipo de fuente que se quiera detectar. El diseño de cualquier detector depende de la escala temporal de las señales que debe buscar.

Se están desarrollando varios experimentos para la detección de ondas gravitacionales. Algunos se basan en observar las oscilaciones inducidas por las ondas gravitacionales en barras de aluminio de varias toneladas de peso y enfriadas a temperaturas por debajo de 1 kelvin. El primero en emplear esta técnica, a finales de la década de 1960, fue Joseph Weber, de la Universidad de Maryland, Estados Unidos. Sin embargo, las técnicas más prometedoras para fabricar detectores muy sensibles consisten en colgar masas de unas decenas de kilos en péndulos situados a varios kilómetros de distancia sobre la superficie terrestre y emplear interferómetros láser para medir sus movimientos, o realizar medidas entre satélites artificiales libres de rozamiento separados por varios millones de kilómetros, en órbitas suficientemente altas para no estar sometidos a los efectos de la atmósfera terrestre. En estos casos, los dos objetos de referencia se colocan formando dos trayectorias en ángulo y se miden los cambios en la longitud relativa de ambas trayectorias o brazos.

En Estados Unidos se están construyendo dos sistemas de detectores, cada uno con brazos de 4 Km. de longitud, como parte del proyecto LIGO; el primero está en el estado de Washington, y el segundo en Luisiana. En Europa, el interferómetro italo-francés VIRGO, con brazos de 3 Km. de longitud, se está construyendo cerca de Pisa, en el norte de Italia. Científicos alemanes y británicos están colaborando en la

construcción del GEO 600, un interferómetro más corto con brazos de 600 m y diseño tecnológico avanzado situado cerca de Hannover, en el noroeste de Alemania. En Japón se está construyendo un detector con brazos algo más cortos. Se prevé que estos detectores sean operativos hacia finales de siglo, y que las observaciones realizadas en colaboración permitan la primera detección directa de ondas gravitacionales. También se están desarrollando planes para realizar detectores con líneas de referencia de gran longitud.

Debido a los efectos de fluctuaciones gravitatorias locales, los detectores de ondas gravitacionales situados en la Tierra sólo podrán buscar señales por encima de un hercio (1 hercio, o Hz, corresponde a un ciclo por segundo). Esto permite buscar colapsos estelares, la fusión de estrellas de neutrones en sistemas binarios y señales de púlsares, ya sean aislados o en sistemas binarios. Sin embargo, existen numerosas fuentes de frecuencia mucho menor, que van desde los sistemas estelares binarios hasta los agujeros negros masivos que interactúan entre sí o con la materia ordinaria, y es muy importante explorar el régimen de bajas frecuencias. Para hacerlo posible, la Agencia Espacial Europea está planteándose lanzar, hacia el año 2015, el LISA, un sistema espacial que emplea satélites y un detector interferométrico láser, con longitudes de brazo de 5 millones de kilómetros.

Luz

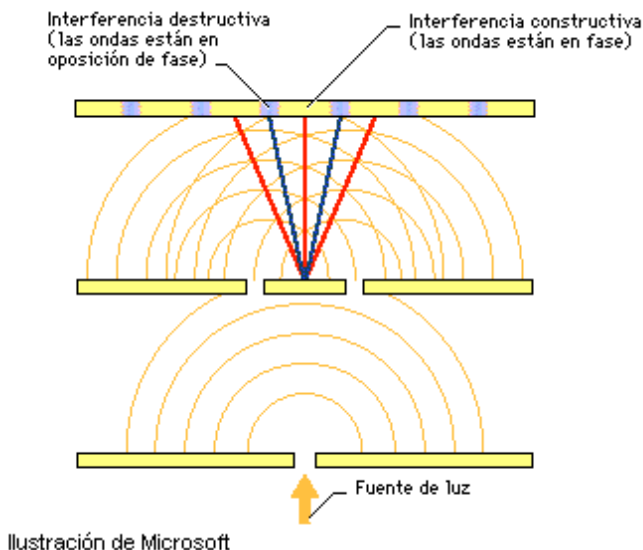
forma de radiación electromagnética similar al calor radiante, las ondas de radio o los rayos X. La luz corresponde a oscilaciones extremadamente rápidas de un campo electromagnético, en un rango determinado de frecuencias que pueden ser detectadas por el ojo humano. Las diferentes sensaciones de color corresponden a luz que vibra con distintas frecuencias, que van desde aproximadamente 4×10^{14} vibraciones por segundo en la luz roja hasta aproximadamente $7,5 \times 10^{14}$ vibraciones por segundo en la luz violeta. El espectro de la luz visible suele definirse por su longitud de onda, que es más pequeña en el violeta (unas 40 millonésimas de centímetro) y máxima en el rojo (75 millonésimas de centímetro). Las frecuencias mayores, que corresponden a longitudes de onda más cortas, incluyen la radiación ultravioleta, y las frecuencias aún más elevadas están asociadas con los rayos X. Las frecuencias menores, con longitudes de onda más altas, se denominan rayos infrarrojos, y las frecuencias todavía más bajas son características de las ondas de radio. La mayoría de la luz procede de electrones que vibran a esas frecuencias al ser calentados a una temperatura elevada. Cuanto mayor es la temperatura, mayor es la frecuencia de vibración y más azul es la luz producida.

Naturaleza de la luz

La luz es emitida por sus fuentes en línea recta, y se difunde en una superficie cada vez mayor a medida que avanza; la luz por unidad de área disminuye según el cuadrado de la distancia. Cuando la luz incide sobre un objeto es absorbida o reflejada; la luz reflejada por una superficie rugosa se difunde en todas direcciones. Algunas frecuencias se reflejan más que otras, y esto da a los objetos su color característico. Las superficies blancas difunden por igual todas las longitudes de onda, y las superficies negras absorben casi toda la luz. Por otra parte, para que la reflexión forme imágenes es necesaria una superficie muy pulida, como la de un espejo.

La definición de la naturaleza de la luz siempre ha sido un problema fundamental de la física. El matemático y físico británico Isaac Newton describió la luz como una emisión de partículas, y el astrónomo, matemático y físico holandés Christiaan Huygens desarrolló la teoría de que la luz se desplaza con un movimiento ondulatorio.

En la actualidad se cree que estas dos teorías son complementarias, y el desarrollo de la teoría cuántica ha llevado al reconocimiento de que en algunos experimentos la luz se comporta como una corriente de partículas y en otros como una onda. En las situaciones en que la luz presenta movimiento ondulatorio, la onda vibra perpendicular a la dirección de propagación; por eso, la luz puede polarizarse en dos ondas perpendiculares entre sí.



Difracción e interferencia de la luz

Cuando la luz pasa a través de una rendija cuyo tamaño es próximo a la longitud de onda de la luz, ésta se difracta, se produce un cambio en la forma de la onda. Cuando la luz pasa a través de dos rendijas, las ondas procedentes de una rendija interfieren con las ondas que vienen de la otra. La interferencia constructiva tiene lugar cuando las ondas llegan en fase, es decir, cuando las crestas (o los valles) de una onda coinciden con las crestas (o los valles) de la otra onda, formando una onda con una cresta (o un valle) mayor. La interferencia destructiva se produce cuando las ondas llegan en oposición de fase, es decir, cuando la cresta de una onda coincide con el valle de la otra onda, cancelándose mutuamente para producir una onda más pequeña o no producir onda alguna.

Velocidad

El primero en medir la velocidad de la luz en un experimento de laboratorio fue el físico francés Armand Hippolyte Louis Fizeau, aunque observaciones astronómicas anteriores habían proporcionado una velocidad aproximadamente correcta. En la actualidad, la velocidad de la luz en el vacío se toma como 299.792.458 m/s, y este valor se emplea para medir grandes distancias a partir del tiempo que emplea un pulso de luz o de ondas de radio para alcanzar un objetivo y volver. Este es el principio del radar. El conocimiento preciso de la velocidad y la longitud de onda de la luz también permite una medida precisa de las longitudes. De hecho, el metro se define en la actualidad como la longitud recorrida por la luz en el vacío en un intervalo de tiempo de $1/299.792.458$ segundos. La velocidad de la luz en el aire es ligeramente distinta según la longitud de onda, y en promedio es un 3% menor que en el vacío; en el agua es aproximadamente un 25% menor, y en el vidrio ordinario un 33% menor.

La luz tiene un efecto importante en muchos compuestos químicos. Las plantas, por ejemplo, emplean la luz solar para llevar a cabo la fotosíntesis, y la exposición a la luz de determinados compuestos de plata hace que se oscurezcan en presencia de otros compuestos químicos, característica empleada en la fotografía.

Rayos X

radiación electromagnética penetrante, con una longitud de onda menor que la luz visible, producida bombardeando un blanco generalmente de wolframio con electrones de alta velocidad. Los rayos X fueron descubiertos de forma accidental en 1895 por el físico alemán Wilhelm Conrad Roentgen mientras estudiaba los rayos catódicos en un tubo de descarga gaseosa de alto voltaje. A pesar de que el tubo estaba dentro de una caja de cartón negro, Roentgen vio que una pantalla de platino cianuro de bario, que casualmente estaba cerca,

emitía luz fluorescente siempre que funcionaba el tubo. Tras realizar experimentos adicionales, determinó que la fluorescencia se debía a una radiación invisible más penetrante que la radiación ultravioleta (véase Luminiscencia). Roentgen llamó a los rayos invisibles rayos X por su naturaleza desconocida. Posteriormente, los rayos X fueron también denominados rayos Roentgen en su honor.

Naturaleza de los rayos X

Los rayos X son radiaciones electromagnéticas cuya longitud de onda va desde unos 10 nm hasta 0,001 nm (1 nm o nanómetro equivale a 10^{-9} m). Cuanto menor es la longitud de onda de los rayos X, mayores son su energía y poder de penetración. Los rayos de mayor longitud de onda, cercanos a la banda ultravioleta del espectro electromagnético, se conocen como rayos X blandos; los de menor longitud de onda, que están más próximos a la zona de rayos gamma o incluso se solapan con ésta, se denominan rayos X duros. Los rayos X formados por una mezcla de muchas longitudes de onda diferentes se conocen como rayos X 'blancos', para diferenciarlos de los rayos X monocromáticos, que tienen una única longitud de onda. Tanto la luz visible como los rayos X se producen a raíz de las transiciones de los electrones atómicos de una órbita a otra. La luz visible corresponde a transiciones de electrones externos y los rayos X a transiciones de electrones internos. En el caso de la radiación de frenado o bremsstrahlung (ver más adelante), los rayos X se producen por el frenado o deflexión de electrones libres que atraviesan un campo eléctrico intenso. Los rayos gamma, cuyos efectos son similares a los de los rayos X, se producen por transiciones de energía en el interior de núcleos excitados.

Radio

sistema de comunicación mediante ondas electromagnéticas que se propagan por el espacio. Debido a sus características variables, se utilizan ondas radiofónicas de diferente longitud para distintos fines; por lo general se identifican mediante su frecuencia. Las ondas más cortas poseen una frecuencia (número de ciclos por segundo) más alta; las ondas más largas tienen una frecuencia más baja (menos ciclos por segundo).

El nombre del pionero alemán de la radio Heinrich Hertz ha servido para bautizar al ciclo por segundo (hertz, hercio o hertzio, Hz). Un kilohercio (Khz.) es 1.000 ciclos por segundo, 1 megahercio (MHz) 1 millón de ciclos por segundo y 1 giga hercio (GHz) es 1 billón de ciclos por segundo. Las ondas de radio van desde algunos kilohertzios a varios giga hertzios. Las ondas de luz visible son mucho más cortas. En el vacío, toda radiación electromagnética se desplaza en forma de ondas a una velocidad uniforme de 300.000 kilómetros por segundo.

Las ondas de radio se utilizan no sólo en la radiodifusión, sino también en la telegrafía inalámbrica, la transmisión por teléfono, la televisión, el radar, los sistemas de navegación y la comunicación espacial. En la atmósfera, las características físicas del aire ocasionan pequeñas variaciones en el movimiento ondulatorio, que originan errores en los sistemas de comunicación radiofónica como el radar. Además, las tormentas o las perturbaciones eléctricas provocan fenómenos anormales en la propagación de las ondas de radio.

Las ondas electromagnéticas dentro de una atmósfera uniforme se desplazan en línea recta, y como la superficie terrestre es prácticamente esférica, la comunicación radiofónica a larga distancia es posible gracias a la reflexión de las ondas de radio en la ionosfera. Las ondas radiofónicas de longitud inferior a unos 10 m, que reciben los nombres de frecuencias muy alta, ultra elevada y súper elevada (VHF, UHF y SHF), no se reflejan en la ionosfera; así, en la práctica, estas ondas muy cortas sólo se captan a distancia visual. Las longitudes de onda inferiores a unos pocos centímetros son absorbidas por las gotas de agua o por las nubes; las inferiores a 1,5 cm pueden quedar absorbidas por el vapor de agua existente en la atmósfera limpia.

Frecuencia

término empleado en física para indicar el número de veces que se repite en un segundo cualquier fenómeno

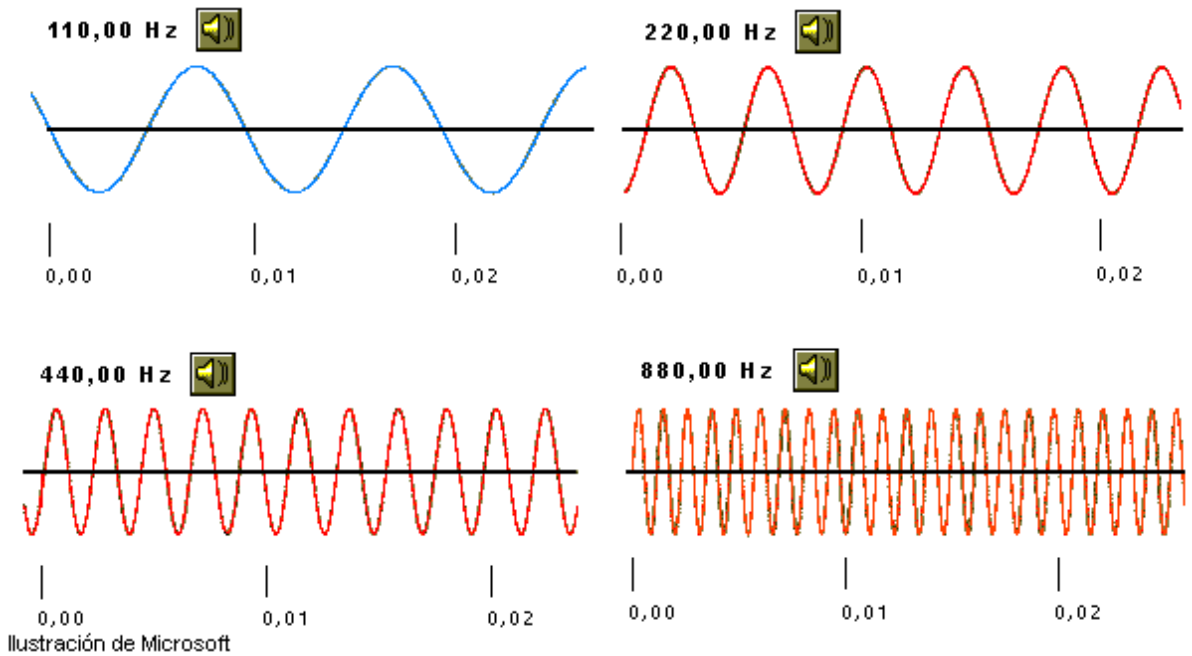
periódico. La frecuencia es muy importante en muchas áreas de la física, como la mecánica o el estudio de las ondas de sonido.

Las frecuencias de los objetos oscilantes abarcan una amplísima gama de valores. Los temblores de los terremotos pueden tener una frecuencia inferior a 1, mientras que las veloces oscilaciones electromagnéticas de los rayos gamma pueden tener frecuencias de 1020 o más. En casi todas las formas de vibración mecánica existe una relación entre la frecuencia y las dimensiones físicas del objeto que vibra. Por ejemplo, el tiempo que necesita un péndulo para realizar una oscilación completa depende en parte de la longitud del péndulo; la frecuencia de vibración de la cuerda de un instrumento musical está determinada en parte por la longitud de la cuerda. En general, cuanto más corto es el objeto, mayor es la frecuencia de vibración.

En todas las clases de movimiento ondulatorio, la frecuencia de la onda suele darse indicando el número de crestas de onda que pasan por un punto determinado cada segundo. La velocidad de la onda y su frecuencia y longitud de onda están relacionadas entre sí. La longitud de onda (la distancia entre dos crestas consecutivas) es inversamente proporcional a la frecuencia y directamente proporcional a la velocidad. En términos matemáticos, esta relación se expresa por la ecuación $v = \lambda f$, donde v es la velocidad, f es la frecuencia y λ (la letra griega lambda) es la longitud de onda. A partir de esta ecuación puede hallarse cualquiera de las tres cantidades si se conocen las otras dos.

La frecuencia se expresa en hercios (Hz); una frecuencia de 1 Hz significa que existe 1 ciclo u oscilación por segundo. La unidad se llama así en honor del físico alemán Heinrich Rudolf Hertz, el primero en demostrar la naturaleza de la propagación de las ondas electromagnéticas. Las unidades como kilohercios (Khz.) miles de ciclos por segundo, megahercios (MHz) millones de ciclos por segundo y giga hercios (GHz) miles de millones de ciclos por segundo se usan para describir fenómenos de alta frecuencia como las ondas de radio. Estas ondas y otros tipos de radiación electromagnética pueden caracterizarse por sus longitudes de onda o por sus frecuencias. Las ondas electromagnéticas de frecuencias extremadamente elevadas, como la luz o los rayos X, suelen describirse mediante sus longitudes de onda, que frecuentemente se expresan en nanómetros (un nanómetro, abreviado nm, es una milmillonésima de metro). Una onda electromagnética con una longitud de onda de 1 nm tiene una frecuencia de aproximadamente 300 millones de GHz.

Frecuencia modulada (FM), sistema de transmisión de radio en el que la onda portadora se modula de forma que su frecuencia varíe según la señal de audio transmitida. El primer sistema operativo de comunicación radiofónica fue descrito por el inventor norteamericano Edwin H. Armstrong en 1936.



Frecuencia:

Percibimos la frecuencia de los sonidos como tonos más graves o más agudos. La frecuencia es el número de ciclos (oscilaciones) que una onda sonora efectúa en un tiempo dado; se mide en hercios (ciclos por segundo). En este ejemplo escuchamos una misma nota (la) a diferentes frecuencias, de 110,00 a 880,00 hercios (Hz). Los seres humanos sólo podemos percibir el sonido en un rango de frecuencias relativamente reducido, aproximadamente entre 20 y 20.000 hercios.

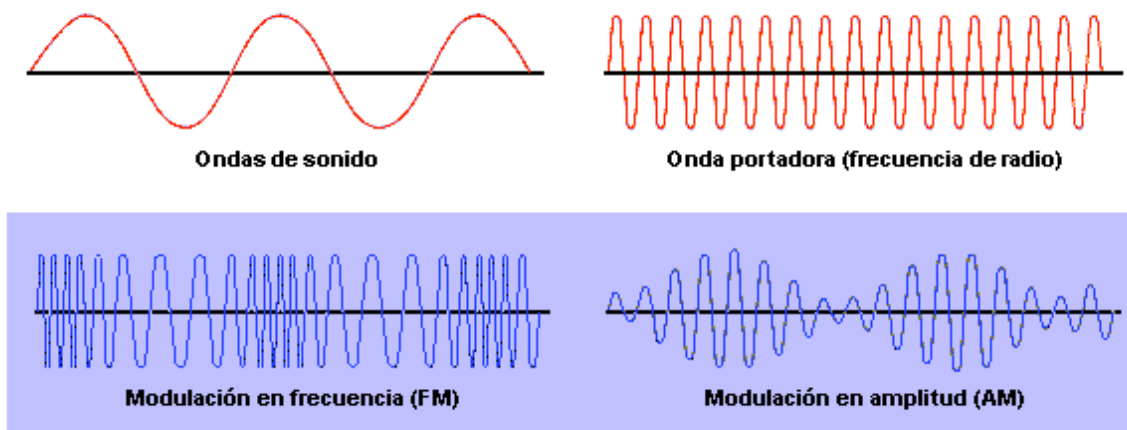


Ilustración de Microsoft

Modulación de radio

Las ondas de frecuencia audio hay que mezclarlas con ondas portadoras para poder ser emitidas por la radio. Es necesario modificar la frecuencia (ritmo de oscilación) o la amplitud (altura) mediante un proceso

denominado modulación. Estos dos procesos explican la existencia de los dos tipos de estaciones AM o FM en la radio. Las señales son totalmente diferentes, por lo que no pueden recibirse simultáneamente.

La ecuación de onda

El movimiento ondulatorio puede expresarse en forma matemática mediante una ecuación que describa un movimiento vibratorio avanzando por un medio. Para ello es preciso partir de la ecuación que define la oscilación del foco u origen de la perturbación. Si el movimiento es armónico simple su ecuación correspondiente será:

$$Y = A \cdot \text{sen } \delta t$$

o también
$$Y = A \cdot \text{sen} \left(\frac{2\pi}{T} t \right)$$

$$Y = A \cdot \text{sen} (2\delta ft)$$

Donde la elongación se representa, en este caso, por la letra Y, pues en ondas transversales, como sucede en las cuerdas, equivale a una altura.

Dado que la perturbación avanza a una velocidad v, en recorrer una distancia r invertirá un tiempo $t' = \frac{r}{v}$.

Eso significa que el estado de perturbación de cualquier punto P situado a una distancia r del foco O coincidirá con el que tenía el foco t' segundos antes. Se trata de un tiempo de retardo que indica en cuánto se ha retrasado la perturbación al llegar a P respecto del foco.

Por tanto, si en la ecuación de la elongación que describe la situación del foco, se cambia t por t-t' se obtiene una ecuación que describe el estado de perturbación del punto P:

$$Y = A \cdot \text{sen } \omega \left(t - \frac{r}{v} \right)$$

Dado que t y r hacen referencia a instantes genéricos y distancias genéricas respecto del foco O, la anterior ecuación describe el estado de perturbación del medio, medido por la altura Y en cualquier punto y en cualquier instante, lo que constituye una buena descripción matemática de una onda armónica.

El argumento de la función seno correspondiente puede expresarse también en la forma

$$\omega \left(t - \frac{r}{v} \right) = \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{r}{\lambda/T} \right) = 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r}{\lambda} \right)$$

dado que $\delta = 2\pi/T$ y $v = \delta/\lambda$; lo cual permite escribir la ecuación de ondas en función de sus parámetros o constantes características, tales como la amplitud A, el periodo T y la longitud λ .

$$Y = A \cdot \text{sen } 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r}{\lambda} \right)$$

La ecuación de onda recibe también el nombre de función de onda y puede referirse a una perturbación genérica que no consista precisamente en una altura, si se sustituye Y por la letra griega δ que designa la magnitud de la perturbación. En tal caso, la función de onda toma la forma

$$\psi = A \cdot \text{sen } 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r}{\lambda} \right)$$

en donde δ puede representar la alteración, con el tiempo, de propiedades físicas tan diversas como una densidad, una presión, un campo eléctrico o un campo magnético, por ejemplo, y su propagación por el espacio.

Comportamiento de las ondas

La velocidad de una onda en la materia depende de la elasticidad y densidad del medio. En una onda transversal a lo largo de una cuerda tensa, por ejemplo, la velocidad depende de la tensión de la cuerda y de su densidad lineal o masa por unidad de longitud. La velocidad puede duplicarse cuadruplicando la tensión, o reducirse a la mitad cuadruplicando la densidad lineal. La velocidad de las ondas electromagnéticas en el vacío (entre ellas la luz) es constante y su valor es de aproximadamente 300.000 km/s. Al atravesar un medio material esta velocidad varía sin superar nunca su valor en el vacío.

Cuando dos ondas se encuentran en un punto, el desplazamiento resultante en ese punto es la suma de los desplazamientos individuales producidos por cada una de las ondas. Si los desplazamientos van en el mismo sentido, ambas ondas se refuerzan; si van en sentido opuesto, se debilitan mutuamente. Este fenómeno se conoce como interferencia.

Cuando dos ondas de igual amplitud, longitud de onda y velocidad avanzan en sentido opuesto a través de un medio se forman ondas estacionarias. Por ejemplo, si se ata a una pared el extremo de una cuerda y se agita el otro extremo hacia arriba y hacia abajo, las ondas se reflejan en la pared y vuelven en sentido inverso. Si suponemos que la reflexión es perfectamente eficiente, la onda reflejada estará media longitud de onda retrasada con respecto a la onda inicial. Se producirá interferencia entre ambas ondas y el desplazamiento resultante en cualquier punto y momento será la suma de los desplazamientos correspondientes a la onda incidente y la onda reflejada. En los puntos en los que una cresta de la onda incidente coincide con un valle de la reflejada, no existe movimiento; estos puntos se denominan nodos. A mitad de camino entre dos nodos, las dos ondas están en fase, es decir, las crestas coinciden con crestas y los valles con valles; en esos puntos, la amplitud de la onda resultante es dos veces mayor que la de la onda incidente; por tanto, la cuerda queda dividida por los nodos en secciones de una longitud de onda. Entre los nodos (que no avanzan a través de la cuerda), la cuerda vibra transversalmente.

Las ondas estacionarias aparecen también en las cuerdas de los instrumentos musicales. Por ejemplo, una cuerda de violín vibra como un todo (con nodos en los extremos), por mitades (con un nodo adicional en el centro), por tercios. Todas estas vibraciones se producen de forma simultánea; la vibración de la cuerda como un todo produce el tono fundamental y las restantes vibraciones generan los diferentes armónicos.

En mecánica cuántica, la estructura del átomo se explica por analogía con un sistema de ondas estacionarias. Gran parte de los avances de la física moderna se basan en elaboraciones de la teoría de las ondas y el movimiento ondulatorio.

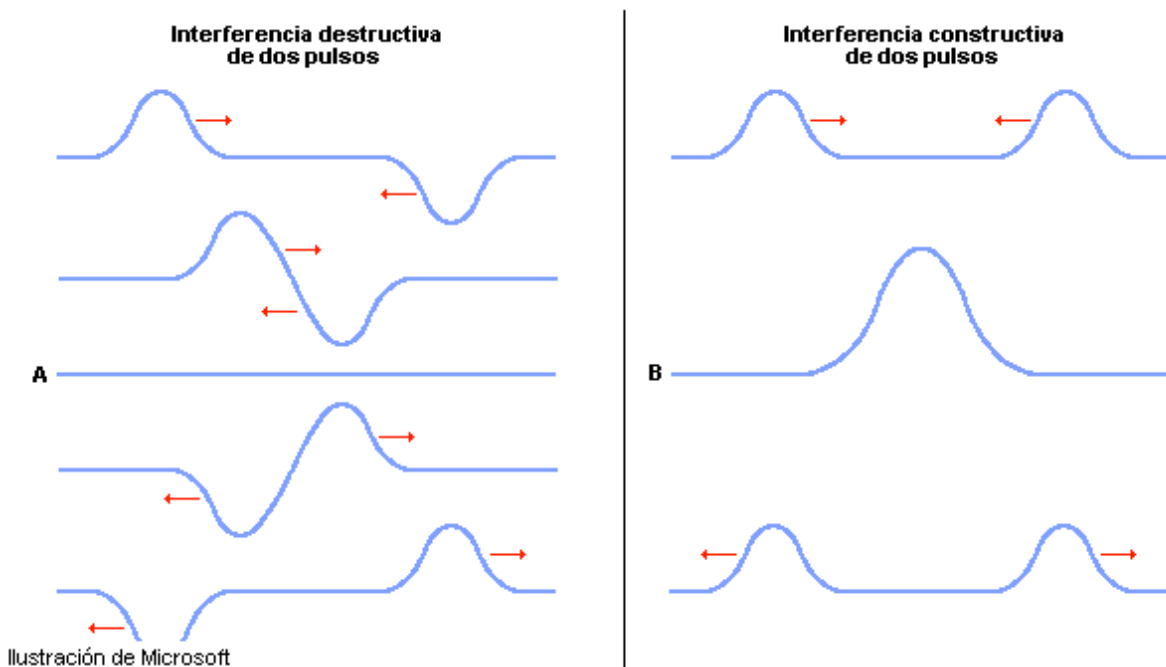
Interferencia

efecto que se produce cuando dos o más ondas se solapan o entrecruzan. Cuando las ondas interfieren entre sí, la amplitud (intensidad o tamaño) de la onda resultante depende de las frecuencias, fases relativas (posiciones relativas de crestas y valles) y amplitudes de las ondas iniciales; Por ejemplo, la interferencia constructiva se produce en los puntos en que dos ondas de la misma frecuencia que se solapan o entrecruzan están en fase; es decir, cuando las crestas y los valles de ambas ondas coinciden. En ese caso, las dos ondas se refuerzan mutuamente y forman una onda cuya amplitud es igual a la suma de las amplitudes individuales de las ondas originales. La interferencia destructiva se produce cuando dos ondas de la misma frecuencia están

completamente desfasadas una respecto a la otra; es decir, cuando la cresta de una onda coincide con el valle de otra. En este caso, las dos ondas se cancelan mutuamente. Cuando las ondas que se cruzan o solapan tienen frecuencias diferentes o no están exactamente en fase ni desfasadas, el esquema de interferencia puede ser más complejo.

La luz visible está formada por ondas electromagnéticas que pueden interferir entre sí. La interferencia de ondas de luz causa, por ejemplo, las irisaciones que se ven a veces en las burbujas de jabón. La luz blanca está compuesta por ondas de luz de distintas longitudes de onda. Las ondas de luz reflejadas en la superficie interior de la burbuja interfieren con las ondas de esa misma longitud reflejadas en la superficie exterior. En algunas de las longitudes de onda, la interferencia es constructiva, y en otras destructiva. Como las distintas longitudes de onda de la luz corresponden a diferentes colores, la luz reflejada por la burbuja de jabón aparece coloreada. El fenómeno de la interferencia entre ondas de luz visible se utiliza en holografía e interferometría (véase Holograma; Interferómetro).

La interferencia puede producirse con toda clase de ondas, no sólo ondas de luz. Las ondas de radio interfieren entre sí cuando rebotan en los edificios de las ciudades, con lo que la señal se distorsiona. Cuando se construye una sala de conciertos hay que tener en cuenta la interferencia entre ondas de sonido, para que una interferencia destructiva no haga que en algunas zonas de la sala no puedan oírse los sonidos emitidos desde el escenario. Arrojando objetos al agua estancada se puede observar la interferencia de ondas de agua, que es constructiva en algunos puntos y destructiva en otros.



Cuando dos pulsos que avanzan por una cuerda se encuentran, sus amplitudes se suman formando un pulso resultante. Si los pulsos son idénticos pero avanzan por lados opuestos de la cuerda, la suma de las amplitudes es cero y la cuerda aparecerá plana durante un momento (A). Esto se conoce como interferencia destructiva. Cuando dos pulsos idénticos se desplazan por el mismo lado, la suma de amplitudes es el doble de la de un único pulso (B). Esto se llama interferencia constructiva.

La difracción

Las ondas son capaces de traspasar orificios y bordear obstáculos interpuestos en su camino. Esta propiedad característica del comportamiento ondulatorio puede ser explicada como consecuencia del principio de Huygens y del fenómeno de interferencias.

Así, cuando una fuente de ondas alcanza una placa con un orificio o rendija central, cada punto de la porción del frente de ondas limitado por la rendija se convierte en foco emisor de ondas secundarias todas de idéntica frecuencia. Los focos secundarios que corresponden a los extremos de la abertura generan ondas que son las responsables de que el haz se abra tras la rendija y bordee sus esquinas. En los puntos intermedios se producen superposiciones de las ondas secundarias que dan lugar a zonas de intensidad máxima y de intensidad mínima típicas de los fenómenos de interferencias.

Ambos fenómenos que caracterizan la difracción de las ondas dependen de la relación existente entre el tamaño de la rendija o del obstáculo y la longitud de onda. Así, una rendija cuya anchura sea del orden de la longitud de la onda considerada, será completamente bordeada por la onda incidente y, además, el patrón de interferencias se reducirá a una zona de máxima amplitud idéntica a un foco. Es como si mediante este procedimiento se hubiera seleccionado uno de los focos secundarios descritos por Huygens en el principio que lleva su nombre.

Sismo o Terremoto

vibraciones producidas en la corteza terrestre cuando las rocas que se han ido tensando se rompen de forma súbita y rebotan. Las vibraciones pueden oscilar desde las que apenas son apreciables hasta las que alcanzan carácter catastrófico. En el proceso se generan seis tipos de ondas de choque. Dos se clasifican como ondas internas viajan por el interior de la Tierra y las otras cuatro son ondas superficiales. Las ondas se diferencian además por las formas de movimiento que imprimen a la roca. Las ondas primarias o de compresión (ondas P) hacen oscilar a las partículas desde atrás hacia adelante en la misma dirección en la que se propagan, mientras que las ondas secundarias o de cizalla (ondas S) producen vibraciones perpendiculares a su propagación. Las ondas P siempre viajan a velocidades mayores que las de las ondas S; así, cuando se produce un sismo, son las primeras que llegan y que se registran en las estaciones de investigación geofísica distribuidas por el mundo.

Tipos y localizaciones de los terremotos

En la actualidad se reconocen tres clases generales de terremotos: tectónicos, volcánicos y artificiales. Los sismos de la primera de ellas son, con diferencia, los más devastadores además de que plantean dificultades especiales a los científicos que intentan predecirlos.

Los causantes últimos de los terremotos de la tectónica de placas son las tensiones creadas por los movimientos de alrededor de doce placas, mayores y menores, que forman la corteza terrestre. La mayoría de los sismos tectónicos se producen en las fronteras de dichas placas, en zonas donde alguna de ellas se desliza sobre otra, como ocurre en la falla de San Andrés en California y México, o es subducida (se desliza bajo otra). Los sismos de las zonas de subducción son casi la mitad de los sucesos sísmicos destructivos y liberan el 75% de la energía sísmica. Están concentrados en el llamado Anillo de Fuego, una banda estrecha de unos 38.600 Km. de longitud que coincide con las orillas del océano Pacífico. En estos sismos los puntos donde se rompe la corteza terrestre suelen estar a gran profundidad, hasta 645 Km. bajo tierra. En Alaska, el desastroso terremoto del Viernes Santo de 1964 es un ejemplo de este caso.

Los terremotos tectónicos localizados fuera del Anillo de Fuego se producen en diversos medios. Las dorsales oceánicas (centros de expansión del fondo marino) son el escenario de muchos de los de intensidad moderada que tienen lugar a profundidades relativamente pequeñas. Casi nadie siente estos sismos que representan sólo un 5% de la energía sísmica terrestre, pero se registran todos los días en la red mundial de estaciones sismológicas. Otro escenario de sismos tectónicos es una zona que se extiende desde el Mediterráneo y el mar Caspio, a través del Himalaya, terminando en la bahía de Bengala. En esta región, donde se libera el 15% de la energía sísmica, las masas continentales de las placas euroasiática, africana y australiana se juntan formando cordilleras montañosas jóvenes y elevadas. Los terremotos resultantes, producidos a profundidades entre pequeñas e intermedias, han devastado con frecuencia regiones de Portugal, Argelia, Marruecos, Italia, Grecia, Turquía, Macedonia y otras zonas de la península de los Balcanes, Irán y la India.

Otra categoría de sismos tectónicos incluye a los infrecuentes pero grandes terremotos destructivos producidos en zonas alejadas de cualquier otra forma de actividad tectónica. Los principales ejemplos de estos casos son los tres temblores masivos que sacudieron la región de Missouri, en 1811 y 1812; tuvieron potencia suficiente para ser sentidos a 1.600 Km. de distancia y produjeron desplazamientos que desviaron el río Mississippi. Los geólogos creen que estos temblores fueron síntoma de las fuerzas que desgarran la corteza terrestre, como las que crearon el Rift Valley en África.

De las dos clases de terremotos no tectónicos, los de origen volcánico son rara vez muy grandes o destructivos. Su interés principal radica en que suelen anunciar erupciones volcánicas. Estos sismos se originan cuando el magma asciende rellenoando las cámaras inferiores de un volcán. Mientras que las laderas y la cima se dilatan y se inclinan, la ruptura de las rocas en tensión puede detectarse gracias a una multitud de pequeños temblores. En la isla de Hawai, los sismógrafos pueden registrar hasta mil pequeños sismos diarios antes de una erupción.

Los seres humanos pueden inducir la aparición de terremotos cuando realizan determinadas actividades, por ejemplo en el relleno de nuevos embalses (presas), en la detonación subterránea de explosivos atómicos o en el bombeo de líquidos de las profundidades terrestres. Incluso se pueden producir temblores esporádicos debidos al colapso subterráneo de minas antiguas.

Radiación

proceso de transmisión de ondas o partículas a través del espacio o de algún medio; el término también se emplea para las propias ondas o partículas. Las ondas y las partículas tienen muchas características comunes; no obstante, la radiación suele producirse predominantemente en una de las dos formas. La radiación mecánica corresponde a ondas que sólo se transmiten a través de la materia, como las ondas de sonido. La radiación electromagnética es independiente de la materia para su propagación; sin embargo, la velocidad, intensidad y dirección de su flujo de energía se ven influidos por la presencia de materia. Esta radiación abarca una gran variedad de energías. La radiación electromagnética con energía suficiente para provocar cambios en los átomos sobre los que incide se denomina radiación ionizante. La radiación de partículas también puede ser ionizante si tiene suficiente energía. Algunos ejemplos de radiación de partículas son los rayos cósmicos, los rayos alfa o los rayos beta. Los rayos cósmicos son chorros de núcleos cargados positivamente, en su mayoría núcleos de hidrógeno (protones). Los rayos cósmicos también pueden estar formados por electrones, rayos gamma, piones y muones. Los rayos alfa son chorros de núcleos de helio positivamente cargados, generalmente procedentes de materiales radiactivos. Los rayos beta son corrientes de electrones, también procedentes de fuentes radiactivas.

Radiación electromagnética

ondas producidas por la oscilación o la aceleración de una carga eléctrica. Las ondas electromagnéticas tienen componentes eléctricos y magnéticos. La radiación electromagnética puede ordenarse en un espectro que se extiende desde ondas de frecuencias muy elevadas (longitudes de onda pequeñas) hasta frecuencias muy bajas (longitudes de onda altas). La luz visible es sólo una pequeña parte del espectro electromagnético. Por orden decreciente de frecuencias (o creciente de longitudes de onda), el espectro electromagnético está compuesto por rayos gamma, rayos X duros y blandos, radiación ultravioleta, luz visible, rayos infrarrojos, microondas y ondas de radio. Los rayos gamma y los rayos X duros tienen una longitud de onda de entre 0,005 y 0,5 nanómetros (un nanómetro, o nm, es una millonésima de milímetro). Los rayos X blandos se solapan con la radiación ultravioleta en longitudes de onda próximas a los 50 nm. El ultravioleta, a su vez, da paso a la luz visible, que va aproximadamente desde 400 hasta 800 nm. Los rayos infrarrojos o "radiación de calor" (véase Transferencia de calor) se solapan con las frecuencias de radio de microondas, entre los 100.000 y 400.000 nm. Desde esta longitud de onda hasta unos 15.000 metros, el espectro está ocupado por las diferentes ondas de radio; más allá de la zona de radio, el espectro entra en las bajas frecuencias, cuyas longitudes de onda llegan a medirse en decenas de miles de kilómetros.

Propiedades

Las ondas electromagnéticas no necesitan un medio material para propagarse. Así, estas ondas pueden atravesar el espacio interplanetario e interestelar y llegar a la Tierra desde el Sol y las estrellas. Independientemente de su frecuencia y longitud de onda, todas las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío a una velocidad $c = 299.792 \text{ km/s}$. Todas las radiaciones del espectro electromagnético presentan las propiedades típicas del movimiento ondulatorio, como la difracción y la interferencia. Las longitudes de onda van desde billonésimas de metro hasta muchos kilómetros. La longitud de onda (δ) y la frecuencia (f) de las ondas electromagnéticas, relacionadas mediante la expresión $\delta \cdot f = c$ son importantes para determinar su energía, su visibilidad, su poder de penetración y otras características.

Teoría

El físico británico James Clerk Maxwell estableció la teoría de las ondas electromagnéticas en una serie de artículos publicados en la década de 1860. Maxwell analizó matemáticamente la teoría de los campos electromagnéticos y afirmó que la luz visible era una onda electromagnética.

Los físicos sabían desde principios del siglo XIX que la luz se propaga como una onda transversal (una onda en la que las vibraciones son perpendiculares a la dirección de avance del frente de ondas). Sin embargo, suponían que las ondas de luz requerían algún medio material para transmitirse, por lo que postulaban la existencia de una sustancia difusa, llamada éter, que constituía el medio no observable. La teoría de Maxwell hacía innecesaria esa suposición, pero el concepto de éter no se abandonó inmediatamente, porque encajaba con el concepto newtoniano de un marco absoluto de referencia espaciotemporal. Un famoso experimento realizado por el físico estadounidense Albert Abraham Michelson y el químico de la misma nacionalidad Edward Williams Morley a finales del siglo XIX socavó el concepto del éter, y fue muy importante en el desarrollo de la teoría de la relatividad. De este trabajo concluyó que la velocidad de la radiación electromagnética en el vacío es una cantidad invariante, que no depende de la velocidad de la fuente de radiación o del observador.

Radiación ultravioleta

radiación electromagnética cuyas longitudes de onda van aproximadamente desde los 400 nm, el límite de la luz violeta, hasta los 15 nm, donde empiezan los rayos X. (Un nanómetro, o nm, es una millonésima de milímetro). La radiación ultravioleta puede producirse artificialmente mediante lámparas de arco; la de origen natural proviene principalmente del Sol.

La radiación ultravioleta puede ser dañina para los seres vivos, sobre todo cuando su longitud de onda es baja. La radiación ultravioleta con longitudes de onda inferiores a 300 nm se emplea para esterilizar superficies porque mata a las bacterias y los virus. En los seres humanos, la exposición a radiación ultravioleta de longitudes de onda inferiores a los 310 nm puede producir quemaduras; una exposición prolongada durante varios años puede provocar cáncer de piel.

La atmósfera terrestre protege a los organismos vivos de la radiación ultravioleta del Sol. Si toda la radiación ultravioleta procedente del Sol llegara a la superficie de la Tierra, acabaría probablemente con la mayor parte de la vida en el planeta. Afortunadamente, la capa de ozono de la atmósfera absorbe casi toda la radiación ultravioleta de baja longitud de onda y gran parte de la de alta longitud de onda. Sin embargo, la radiación ultravioleta no sólo tiene efectos perniciosos; gran parte de la vitamina D que las personas y los animales necesitan para mantenerse sanos se produce cuando la piel es irradiada por rayos ultravioleta.

Muchas sustancias se comportan de forma distinta cuando se las expone a luz ultravioleta que cuando se las expone a luz visible. Por ejemplo, algunos minerales, colorantes, vitaminas, aceites naturales y otros productos se vuelven fluorescentes en presencia de luz ultravioleta, es decir, parecen brillar. Las moléculas de

esas sustancias absorben la radiación ultravioleta invisible, adquieren energía, y se desprenden del exceso de energía emitiendo luz visible. Véase Luminiscencia. Otro ejemplo es el vidrio de las ventanas, que es transparente a la luz visible pero opaco a una amplia gama de rayos ultravioletas, especialmente los de baja longitud de onda. Algunos vidrios especiales son transparentes para los rayos ultravioleta de mayor longitud de onda, y el cuarzo es transparente a toda la gama de rayos ultravioleta naturales.

Rayos infrarrojos

emisión de energía en forma de ondas electromagnéticas en la zona del espectro situada inmediatamente después de la zona roja de la radiación visible; La longitud de onda de los rayos infrarrojos es menor que la de las ondas de radio y mayor que la de la luz visible. Oscila entre aproximadamente 10^{-6} y 10^{-3} metros. La radiación infrarroja puede detectarse como calor, para lo que se emplean instrumentos como el bolómetro.

Los rayos infrarrojos se utilizan para obtener imágenes de objetos lejanos ocultos por la bruma atmosférica, que dispersa la luz visible pero no la radiación infrarroja. En astronomía se utilizan los rayos infrarrojos para estudiar determinadas estrellas y nebulosas. Para las fotografías infrarrojas de alta precisión se emplea un filtro opaco que sólo deja pasar radiación infrarroja, pero generalmente basta un filtro corriente anaranjado o rojo claro, que absorbe la luz azul y violeta. La fotografía infrarroja, desarrollada hacia 1880, se ha convertido en la actualidad en una importante herramienta de diagnóstico en la medicina, la agricultura y la industria. El uso de técnicas infrarrojas permite observar situaciones patológicas que no pueden verse a simple vista ni en una radiografía. La teledetección mediante fotografía infrarroja aérea y orbital se ha empleado para observar las condiciones de las cosechas y el daño por insectos y enfermedades en grandes zonas agrícolas, así como para localizar depósitos minerales. En la industria, la espectroscopia de infrarrojos es una parte cada vez más importante de la investigación de metales y aleaciones, y la fotografía infrarroja se emplea para regular la calidad de los productos.

Dispositivos infrarrojos como los empleados durante la II Guerra Mundial permiten ver objetos en la oscuridad. Estos instrumentos consisten básicamente en una lámpara que emite un haz de rayos infrarrojos, a veces denominados luz negra, y un telescopio que recibe la radiación reflejada por el objeto y la convierte en una imagen visible.

Microondas

ondas electromagnéticas de radio situadas entre los rayos infrarrojos (cuya frecuencia es mayor) y las ondas de radio convencionales. Su longitud de onda va aproximadamente desde 1 mm hasta 30 cm. Las microondas se generan con tubos de electrones especiales como el clistrón o el magnetrón, que incorporan resonadores para controlar la frecuencia, o con osciladores o dispositivos de estado sólido especiales. Las microondas tienen muchas aplicaciones: radio y televisión, radares, meteorología, comunicaciones vía satélite, medición de distancias, investigación de las propiedades de la materia o cocinado de alimentos.

Los hornos de microondas funcionan excitando las moléculas de agua de los alimentos, lo que hace que vibren y produzcan calor. Las microondas entran a través de aberturas practicadas en la parte superior de la cavidad de cocción, donde un agitador las dispersa de forma homogénea por todo el horno. Las microondas no pueden penetrar en un recipiente de metal para calentar la comida, pero sí atraviesan los recipientes no metálicos.

Las microondas pueden detectarse con un instrumento formado por un rectificador de diodos de silicio conectado a un amplificador y a un dispositivo de registro o una pantalla. La exposición a las microondas es peligrosa cuando se producen densidades elevadas de radiación, como ocurre en los máseres. Pueden provocar quemaduras, cataratas, daños en el sistema nervioso y esterilidad. Todavía no se conocen bien los posibles peligros de la exposición prolongada a microondas de bajo nivel.

biografías

Huygens, Christiaan (1629–1695), astrónomo, matemático y físico holandés nacido en La Haya. Sus numerosos y originales descubrimientos científicos le valieron un amplio reconocimiento entre los científicos del siglo XVII. Entre sus descubrimientos destaca el principio (posteriormente llamado principio de Huygens) que establece que todo punto de un frente de ondas que avanza, actúa como una fuente de nuevas ondas. A partir de este principio, Huygens desarrolló la teoría ondulatoria de la luz. En 1655 encontró un nuevo método para pulir las lentes, con lo que obtuvo una imagen más nítida que le permitió descubrir un satélite de Saturno y dar la primera descripción precisa de los anillos de este planeta. La necesidad de una medida exacta del tiempo en la observación del cielo le llevó a utilizar el péndulo para regular el movimiento de los relojes. En 1656 inventó un ocular de telescopio que lleva su nombre. En su obra *Horologium oscillatorium* (1673) determinó que realmente existe una relación entre la longitud de un péndulo y el periodo de oscilación, y desarrolló varias teorías sobre la fuerza centrífuga en los movimientos circulares que ayudaron al físico inglés Isaac Newton a formular las leyes de la gravedad. En 1678 descubrió la polarización de la luz mediante la doble refracción en la calcita.

Maxwell, James Clerk (1831–1879), físico británico cuyas investigaciones y escritos explican las propiedades del electromagnetismo. Estos trabajos le convirtieron en uno de los científicos más importantes del siglo XIX. También elaboró la teoría cinética de los gases, que explica las propiedades físicas de los gases y su naturaleza. Entre otros logros hay que destacar la investigación de la visión de los colores y los principios de la termodinámica. estableció la teoría de las ondas electromagnéticas en una serie de artículos publicados en la década de 1860. Maxwell analizó matemáticamente la teoría de los campos electromagnéticos y afirmó que la luz visible era una onda electromagnética.

Nació en Edimburgo y estudió en las universidades de Edimburgo y Cambridge. Fue profesor de física en la Universidad de Aberdeen desde 1856 hasta 1860. En 1871 fue el profesor más destacado de física experimental en Cambridge, donde supervisó la construcción del Laboratorio Cavendish. Maxwell amplió la investigación de Michael Faraday sobre los campos electromagnéticos, demostrando la relación matemática entre los campos eléctricos y magnéticos. También mostró que la luz está compuesta de ondas electromagnéticas. Su obra más importante es el *Treatise on Electricity and Magnetism* (Tratado sobre electricidad y magnetismo, 1873), en donde, por primera vez, publicó su conjunto de cuatro ecuaciones diferenciales en las que describe la naturaleza de los campos electromagnéticos en términos de espacio y tiempo.

Faraday, Michael (1791–1867), nació el 22 de septiembre de 1791 en Newington (Surrey). Era hijo de un herrero y recibió poca formación académica. físico y químico británico, conocido principalmente por sus descubrimientos de la inducción electromagnética y de las leyes de la electrólisis.

Faraday Mientras trabajaba de aprendiz con un encuadernador de Londres, leyó libros de temas científicos y realizó experimentos en el campo de la electricidad. En 1812 asistió a una serie de conferencias impartidas por el químico sir Humphry Davy y envió a éste las notas que tomó en esas conferencias junto con una petición de empleo. Davy le contrató como ayudante en su laboratorio químico de la Institución Real y en 1813 le llevó con él a un largo viaje por Europa. Faraday entró en la Sociedad Real en 1824 y al año siguiente fue nombrado director del laboratorio de la Institución Real. En 1833 sucedió a Davy como profesor de química en esa institución. Dos años más tarde le fue concedida una pensión vitalicia de 300 libras anuales. Faraday recibió numerosos galardones científicos.

Sin embargo, las investigaciones que convirtieron a Faraday en el primer científico experimental de su época las realizó en los campos de la electricidad y el magnetismo. En 1821 trazó el campo magnético alrededor de un conductor por el que circula una corriente eléctrica (la existencia del campo magnético había sido observada por vez primera por el físico danés Hans Christian Oersted en 1819). En 1831 Faraday descubrió la inducción electromagnética, y el mismo año demostró la inducción de una corriente eléctrica por otra. Durante este mismo periodo investigó los fenómenos de la electrólisis y descubrió dos leyes fundamentales: que la masa de una sustancia depositada por una corriente eléctrica en una electrólisis es proporcional a la cantidad

de electricidad que pasa por el electrólito, y que las cantidades de sustancias electrolíticas depositadas por la acción de una misma cantidad de electricidad son proporcionales a las masas equivalentes de las sustancias.

Oersted, Hans Christian (1777–1851), físico y químico danés, que demostró la existencia de un campo magnético en torno a una corriente eléctrica. Nació en Rudkøbing y estudió en la Universidad de Copenhague. Fue profesor de física en esa universidad en 1806. En 1819 descubrió que una aguja imantada se desvía colocándose en dirección perpendicular a un conductor por el que circula una corriente eléctrica, iniciando así el estudio del electromagnetismo. Al parecer, también fue el primero en aislar el (1825) aluminio. En 1844 apareció su Manual de física mecánica.

Planck, Max Karl Ernst Ludwig (1858–1947), físico alemán, premiado con el Nobel, considerado el creador de la teoría cuántica.

Planck nació en Kiel el 23 de abril de 1858 y estudió en las universidades de Munich y Berlín. Fue nombrado profesor de física en la Universidad de Kiel en 1885, y desde 1889 hasta 1928 ocupó el mismo cargo en la Universidad de Berlín. En 1900 Planck formuló que la energía se radia en unidades pequeñas separadas denominadas cuantos. Avanzando en el desarrollo de esta teoría, descubrió una constante de naturaleza universal que se conoce como la constante de Planck. La ley de Planck establece que la energía de cada cuanto es igual a la frecuencia de la radiación multiplicada por la constante universal. Sus descubrimientos, sin embargo, no invalidaron la teoría de que la radiación se propagaba por ondas. Los físicos en la actualidad creen que la radiación electromagnética combina las propiedades de las ondas y de las partículas. Los descubrimientos de Planck, que fueron verificados posteriormente por otros científicos, fueron el nacimiento de un campo totalmente nuevo de la física, conocido como mecánica cuántica y proporcionaron los cimientos para la investigación en campos como el de la energía atómica. Reconoció en 1905 la importancia de las ideas sobre la cuantificación de la radiación electromagnética expuestas por Albert Einstein, con quien colaboró a lo largo de su carrera.

Planck recibió muchos premios por este trabajo, especialmente, el Premio Nobel de Física, en 1918. En 1930 Planck fue elegido presidente de la Sociedad Kaiser Guillermo para el Progreso de la Ciencia, la principal asociación de científicos alemanes, que después se llamó Sociedad Max Planck. Sus críticas abiertas al régimen nazi que había llegado al poder en Alemania en 1933 le forzaron a abandonar la Sociedad, de la que volvió a ser su presidente al acabar la II Guerra Mundial. Murió en Gotinga el 4 de octubre de 1947. Entre sus obras más importantes se encuentran Introducción a la física teórica (5 volúmenes, 1932–1933) y Filosofía de la física (1936).

Einstein, Albert (1879–1955), físico alemán nacionalizado estadounidense, premiado con un Nobel, famoso por ser el autor de las teorías general y restringida de la relatividad y por sus hipótesis sobre la naturaleza corpuscular de la luz. Es probablemente el científico más conocido del siglo XX.

Nació en Ulm el 14 de marzo de 1879 y pasó su juventud en Munich, donde su familia poseía un pequeño taller de máquinas eléctricas. Ya desde muy joven mostraba una curiosidad excepcional por la naturaleza y una capacidad notable para entender los conceptos matemáticos más complejos. A los doce años ya conocía la geometría de Euclides.

A la edad de 15 años, cuando su familia se trasladó a Milán, Italia, a causa de sucesivos fracasos en los negocios, Einstein abandonó la escuela. Pasó un año con sus padres en Milán y viajó a Suiza, donde terminó los estudios secundarios, e ingresó en el Instituto Politécnico Nacional de Zurich.

Durante dos años Einstein trabajó dando clases particulares y de profesor suplente. En 1902 consiguió un trabajo estable como examinador en la Oficina Suiza de Patentes en Berna.

Primeras publicaciones científicas

En 1905 se doctoró por la Universidad de Zurich, con una tesis sobre las dimensiones de las moléculas; también publicó tres artículos teóricos de gran valor para el desarrollo de la física del siglo XX. En el primero de ellos, sobre el movimiento browniano, formuló predicciones importantes sobre el movimiento aleatorio de las partículas dentro de un fluido, predicciones que fueron comprobadas en experimentos posteriores. El segundo artículo, sobre el efecto fotoeléctrico, anticipaba una teoría revolucionaria sobre la naturaleza de la luz. Según Einstein, bajo ciertas circunstancias la luz se comportaba como una partícula. También afirmó que la energía que llevaba toda partícula de luz, denominada fotón, era proporcional a la frecuencia de la radiación. Lo representaba con la fórmula $E = h\delta$, donde E es la energía de la radiación, h una constante universal llamada constante de Planck y δ es la frecuencia de la radiación. Esta teoría, que planteaba que la energía de los rayos luminosos se transfería en unidades individuales llamadas cuantos, contradecía las teorías anteriores que consideraban que la luz era la manifestación de un proceso continuo. Las tesis de Einstein apenas fueron aceptadas. De hecho, cuando el físico estadounidense Robert Andrews Millikan confirmó experimentalmente sus tesis casi una década después, éste se mostró sorprendido e inquieto por los resultados.

Einstein, interesado por comprender la naturaleza de la radiación electromagnética, propugnó el desarrollo de una teoría que fusionara las ondas y partículas de la luz. De nuevo fueron muy pocos los científicos que comprendieron y aceptaron estas ideas.

Teoría especial de la relatividad de Einstein

La tercera publicación de Einstein en 1905, Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento, formulaba lo que después llegó a conocerse como la teoría especial de la relatividad (o teoría restringida de la relatividad). Desde los tiempos del matemático y físico inglés Isaac Newton, los filósofos de las ciencias naturales (nombre que recibían los físicos y químicos) habían intentado comprender la naturaleza de la materia y la radiación, y su interacción en algunos modelos unificados del mundo. La hipótesis que sostenía que las leyes mecánicas eran fundamentales se denominó visión mecánica del mundo. La hipótesis que mantenía que eran las leyes eléctricas las fundamentales recibió el nombre de visión electromagnética del mundo. Ninguna de las dos concepciones era capaz de explicar con fundamento la interacción de la radiación (por ejemplo, la luz) y la materia al ser observadas desde diferentes sistemas de inercia de referencia, o sea, la interacción producida en la observación simultánea por una persona parada y otra moviéndose a una velocidad constante.

En la primavera de 1905, tras haber reflexionado sobre estos problemas durante diez años, Einstein se dio cuenta de que la solución no estaba en la teoría de la materia sino en la teoría de las medidas. En el fondo de su teoría restringida de la relatividad se encontraba el hallazgo de que toda medición del espacio y del tiempo es subjetiva. Esto le llevó a desarrollar una teoría basada en dos premisas: el principio de la relatividad, según el cual las leyes físicas son las mismas en todos los sistemas de inercia de referencia, y el principio de la invariabilidad de la velocidad de la luz, según el cual la velocidad de la luz en el vacío es constante. De este modo pudo explicar los fenómenos físicos observados en sistemas de inercia de referencia distintos, sin tener que entrar en la naturaleza de la materia o de la radiación y su interacción, pero nadie entendió su razonamiento.

Primeras reacciones a Einstein

La dificultad de otros científicos para aceptar la teoría de Einstein no estribaba en sus complejos cálculos matemáticos y su dificultad técnica, sino que partía del concepto que tenía Einstein de las buenas teorías y su relación con la experimentación. Aunque sostenía que la única fuente del conocimiento era la experiencia, también pensaba que las teorías científicas eran creaciones libres de una aguda intuición física, y que las premisas en que se basaban no podían aplicarse de un modo lógico al experimento. Una buena teoría sería, pues, aquella que necesitara los mínimos postulados para explicar un hecho físico. Esta escasez de postulados, característica de la obra de Einstein, provocó que su trabajo no fuera accesible para sus colegas, que le dejaron solo.

Aun así, tenía importantes seguidores. Su primer defensor fue el físico alemán Max Planck. Einstein permaneció cuatro años en la oficina de patentes, y luego empezó a destacar dentro de la comunidad científica, y así ascendió en el mundo académico de lengua alemana. Primero fue a la Universidad de Zurich en 1909; dos años más tarde se trasladó a la Universidad de Praga, de lengua alemana, y en 1912 regresó al Instituto Politécnico Nacional de Zurich. Finalmente, en 1913 fue nombrado director del Instituto de Física Kaiser Guillermo en Berlín.

La teoría general de la relatividad

Antes de dejar la oficina de patentes, en 1907, Einstein ya trabajaba en la extensión y generalización de la teoría de la relatividad a todo sistema de coordenadas. Empezó con el enunciado del principio de equivalencia según el cual los campos gravitacionales son equivalentes a las aceleraciones del sistema de referencia. De este modo, una persona que viajara en un elevador o ascensor no podría en principio determinar si la fuerza que actúa sobre ella se debe a la gravitación o a la aceleración constante del ascensor. Esta teoría general completa de la relatividad no fue publicada hasta 1916. De acuerdo con ella, las interacciones entre los cuerpos, que hasta entonces se atribuían a fuerzas gravitacionales, se explican por la influencia de aquellos sobre la geometría espacio-tiempo (espacio de cuatro dimensiones, una abstracción matemática en la que el espacio se une, como cuarta dimensión, a las tres dimensiones euclidianas).

Basándose en la teoría general de la relatividad, Einstein pudo entender las variaciones hasta entonces inexplicables del movimiento de rotación de los planetas y logró predecir la inclinación de la luz de las estrellas al aproximarse a cuerpos como el Sol. La confirmación de este fenómeno durante un eclipse de Sol en 1919 fue toda una noticia y su fama se extendió por el mundo.

Einstein consagró gran parte del resto de su vida a generalizar su teoría. Su último trabajo, la teoría del campo unificado, que no tuvo demasiado éxito, consistía en un intento de explicar todas las interacciones físicas, incluidas la interacción electromagnética y las interacciones nucleares fuerte y débil, a través de la modificación de la geometría del espacio-tiempo entre entidades interactivas.

La mayoría de sus colegas pensaron que sus esfuerzos iban en dirección equivocada. Entre 1915 y 1930 la corriente principal entre los físicos era el desarrollo de una nueva concepción del carácter fundamental de la materia, conocida como la teoría cuántica. Esta teoría contempla la característica de la dualidad onda-partícula (la luz presenta las propiedades de una partícula, así como las de una onda), que Einstein había intuido como necesaria, y el principio de incertidumbre, que establece que la exactitud de los procedimientos de medición es limitada. Además, esta teoría suponía un rechazo fundamental a la noción estricta de causalidad. Sin embargo, Einstein mantuvo una posición crítica respecto a estas tesis hasta el final de su vida. "Dios no juega a los dados con el mundo", llegó a decir.

Broglie, Louis Víctor, príncipe de (1892–1987), físico y premio Nobel francés, que contribuyó de manera fundamental al desarrollo de la teoría cuántica. De Broglie nació en Dieppe y estudió en la Universidad de París. Trató de racionalizar la doble naturaleza de la materia y la energía, comprobando que las dos están compuestas de corpúsculos y tienen propiedades ondulatorias. Por su descubrimiento de la naturaleza ondulatoria de los electrones (1924), recibió el Premio Nobel de Física en 1929. Fue elegido miembro de la Academia de Ciencias (1933) y de la Academia Francesa (1943). Fue nombrado profesor de física teórica en la Universidad de París (1928), secretario permanente de la Academia de Ciencias (1942) y consejero de la Comisión de Energía Atómica Francesa (1945). Entre sus obras destacan *La física nueva y los cuantos* (1937), *Continuidad y discontinuidad en física moderna* (1941) y *Física y microfísica* (1947).

Roentgen, Wilhelm Conrad (1845–1923), físico alemán y primer Premio Nobel de Física. Roentgen nació en Lennep (hoy parte de Remscheid, Alemania) y estudió en la Universidad de Zurich. En noviembre de 1895 leyó ante la Sociedad Físico-Médica de Würzburg un informe sobre su descubrimiento de radiaciones de onda corta a las que denominó rayos X. Más tarde estos rayos recibieron su nombre pero se siguen

conociendo como rayos X. Entre los muchos galardones por su hallazgo, que revolucionó la física y la medicina, recibió la Medalla Rumford de la Sociedad Real de Londres en 1896 y el primer Premio Nobel de Física en 1901. También realizó descubrimientos en mecánica, calor y electricidad.

Compton, Arthur Holly (1892–1962), físico y premio Nobel estadounidense, cuyos estudios de los rayos X le llevaron a descubrir en 1922 el denominado efecto Compton. El efecto Compton es el cambio de longitud de onda de la radiación electromagnética de alta energía al ser difundida por los electrones. El descubrimiento de este efecto confirmó que la radiación electromagnética tiene propiedades tanto de onda como de partículas, un principio central de la teoría cuántica.

Compton nació en Wooster (Ohio) y estudió en el Wooster College y en la Universidad de Princeton. En 1923 fue profesor de física en la Universidad de Chicago. Durante su estancia en esta universidad, Compton dirigió el laboratorio en el que se produjo la primera reacción nuclear en cadena (véase Energía nuclear). Compton también desempeñó un papel destacado en el desarrollo de la bomba atómica (véase Armas nucleares). Desde 1945 hasta 1953 Compton fue rector de la Universidad de Washington y después de 1954 fue catedrático de Filosofía Natural. Por su descubrimiento del efecto Compton y por su investigación de los rayos cósmicos y de la reflexión, la polarización y los espectros de los rayos X compartió el Premio Nobel de Física de 1927 con el físico británico Charles Wilson.

Bibliografía

- Enciclopedia Encarta 98
- Libro de ciencias físicas
- Enciclopedia de la ciencia y la tecnología

1

1

•