

FÍSICA 5º - 1. La luz. El espectro electromagnético. Ondas.

Teorías de la luz.

Determinar la naturaleza de la luz ha sido una de las controversias más apasionantes de la historia de la ciencia. Las diversas hipótesis, formuladas en distintos momentos históricos para justificar los fenómenos conocidos entonces, se iban modificando a medida que se descubrían nuevos fenómenos. Las primeras teorías merecedoras de atención surgieron casi simultáneamente durante el siglo XVII y fueron propuestas por el inglés I. Newton (1642-1727) y el holandés Ch. Huygens (1629-1695). Las dos hipótesis, aparentemente contradictorias entre sí, se han denominado, respectivamente, la *teoría corpuscular de Newton* y la *teoría ondulatoria de Huygens*.

1.- Teoría corpuscular de Newton.

En su obra *Óptica*, publicada en 1704, Newton describió que la luz tiene **naturaleza corpuscular**: los focos luminosos emiten minúsculas partículas que se propagan en línea recta en todas las direcciones y, al chocar con nuestros ojos, producen la sensación luminosa. Los corpúsculos, distintos para cada color, son capaces de atravesar los medios transparentes y son reflejados por los cuerpos opacos. Esta hipótesis explicaba fenómenos como la propagación rectilínea de la luz y la reflexión, pero no aclaraba bien otros como la refracción. Para poder justificarlo, hubo de suponer que la luz viaja a mayor velocidad en los líquidos y en los vidrios que en el aire, lo que posteriormente se comprobó que era falso. Tampoco explicaba la interferencia ni la difracción que se descubrieron más tarde.

2.- Teoría ondulatoria de Huygens.

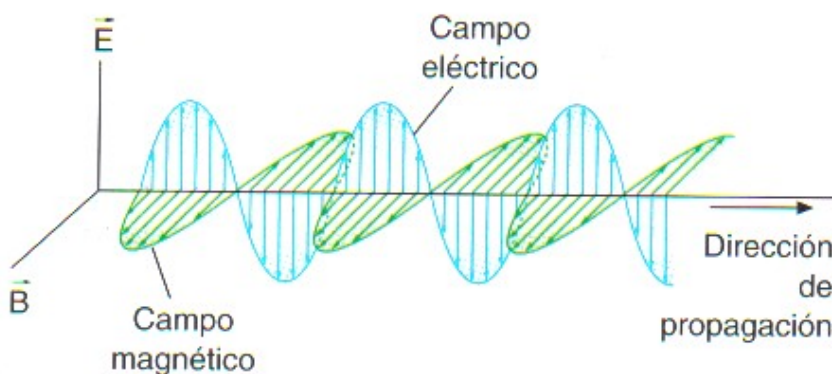
Poco antes que Newton, Huygens en su obra *Tratado de la luz*, publicada en 1690, propuso que: la luz consiste en la propagación de una perturbación ondulatoria del medio. Huygens creía que se trataba de **ondas longitudinales** similares a las ondas sonoras, es decir, ondas longitudinales. Esta hipótesis explicaba fácilmente ciertos fenómenos como la reflexión, la refracción de la luz y la doble refracción, descubierta por entonces. Pese a ello, no fue comúnmente aceptada. La mayoría de los científicos se adhirió a la teoría corpuscular de Newton, dado su gran prestigio. La mayor dificultad de la teoría ondulatoria residía en que no se habían observado en la luz fenómenos típicamente ondulatorios como la difracción. Hoy sabemos que su longitud de onda es tan pequeña que estos fenómenos se producen aunque no es fácil observarlos.

3.- Teoría ondulatoria de Fresnel.

A principios del siglo XIX diversos avances revalorizaron la hipótesis ondulatoria de la luz. Algunos de ellos fueron: las experiencias, en 1801, del médico y físico inglés T. Young (1773-1829) sobre interferencias luminosas, el descubrimiento en 1808 de la polarización de la luz, o las experiencias en 1815 del físico francés A. J. Fresnel (1788-1827) sobre la difracción. Fresnel mostró la insuficiencia de la teoría corpuscular para justificar estos descubrimientos e hizo una nueva propuesta: la luz está constituida por **ondas transversales**. Más tarde, en 1850, el físico francés J. Foucault (1819-1868) midió la velocidad de la luz en el agua y comprobó que es menor que en el aire, lo que invalidaba la justificación de Newton para la refracción. La hipótesis corpuscular, después de 150 años de aceptación, fue prácticamente abandonada.

4.- Teoría electromagnética de Maxwell.

En 1864, el físico y matemático escocés J. C. Maxwell (1831-1879) estableció la teoría electromagnética de la luz. Adelantándose a la comprobación experimental de la existencia de las ondas electromagnéticas efectuada, en 1887, por el físico alemán H. Hertz (1857-1894), propuso que: la luz no es una onda mecánica sino una forma de **onda electromagnética** de alta frecuencia. Las ondas luminosas consisten en la propagación, sin necesidad de soporte material alguno, de un campo eléctrico y de un campo magnético perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación. Estos dos campos son funciones periódicas tanto de la coordenada en la dirección de propagación como del tiempo. La teoría electromagnética de Maxwell tuvo aceptación general y, al parecer, podía considerarse como la teoría definitiva acerca de la naturaleza de la luz.



5.- Teoría corpuscular de Einstein.

El efecto fotoeléctrico, descubierto en 1887 por H. Hertz, consiste en la emisión de electrones de cierta energía, al incidir la luz de una determinada frecuencia sobre una superficie metálica. Este efecto no podía ser explicado mediante la teoría ondulatoria. A partir de la hipótesis cuántica del físico alemán M. Planck (1858-1947), A. Einstein (1879-1955) propuso en 1905 que: la luz está formada por un haz de pequeños corpúsculos o **cuantos de energía** también llamados **fotones**. Es decir, en los fotones está concentrada la energía de la onda en lugar de estar distribuida de modo continuo por toda ella. La energía de cada uno de los fotones depende de su frecuencia.

$$E = hf \quad h = \text{constante de Plank} = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$$

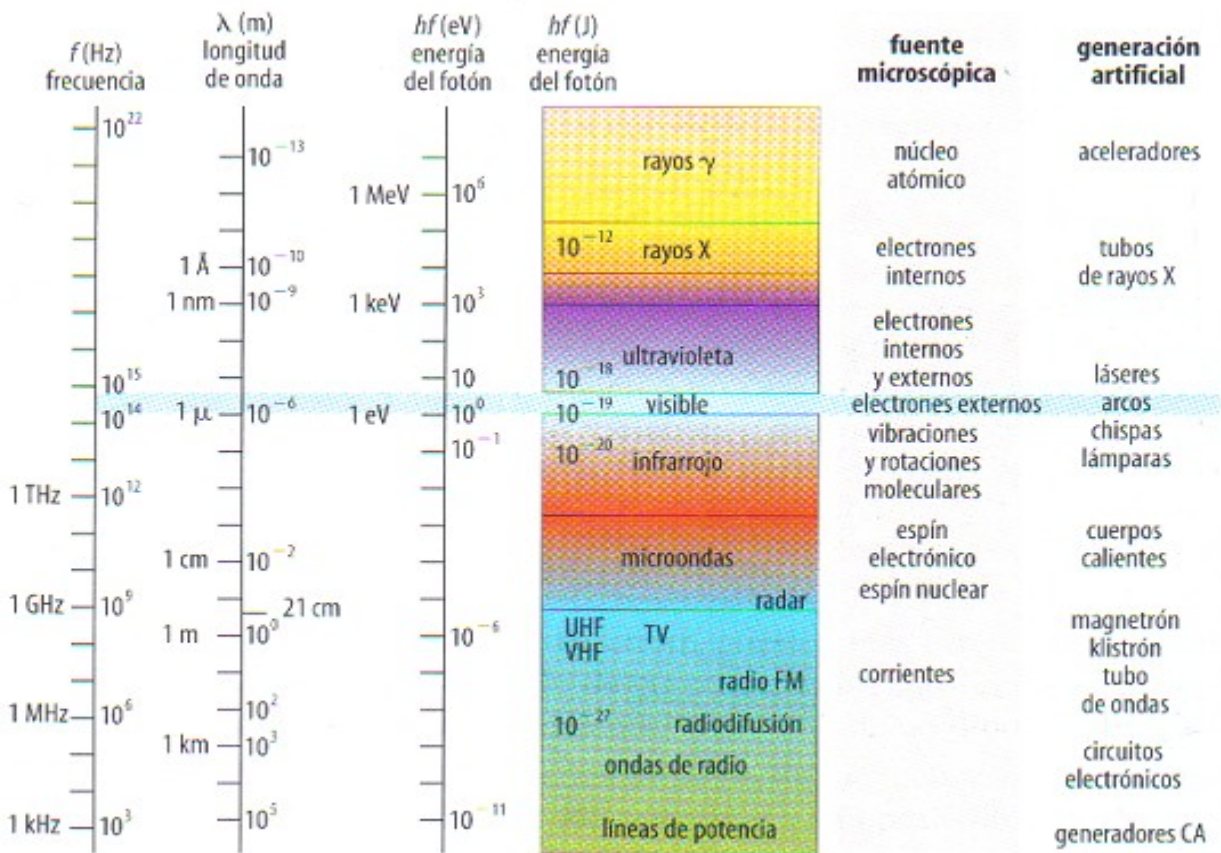
6.- Dualidad onda – corpúsculo.

La luz tiene una doble naturaleza, corpuscular y ondulatoria. Se propaga mediante ondas electromagnéticas y presenta los fenómenos típicamente ondulatorios, pero en su interacción con la materia, en ciertos fenómenos de intercambio de energía, manifiesta un carácter corpuscular, es decir, que la luz se comporta en unas ocasiones como una onda y en otras como una partícula, pero no manifiesta al mismo tiempo las dos características, en un fenómeno concreto se comporta o como onda o como partícula. Se ha comprobado posteriormente que la doble naturaleza de la luz es aplicable también al comportamiento de ciertas partículas, como los electrones. Esta naturaleza dual de la materia, a semejanza de la luz, fue propuesta en 1924 por el físico francés L. de Broglie (1892-1987) y es una de las bases de la física moderna.

El espectro electromagnético.

Se denomina espectro electromagnético al conjunto de todas las radiaciones de diferente frecuencia en que puede descomponerse la radiación electromagnética. La velocidad de propagación de todas ellas en el vacío es la misma, entonces, la frecuencia y la longitud de onda se relacionan según la expresión: $f = c/\lambda$.

El espectro electromagnético se suele dividir en siete zonas que no presentan límites nítidos.



Veamos las propiedades de cada una de las zonas del espectro:

Ondas de radio. Son las que tienen una longitud de onda más larga: desde millones de metros hasta unos 30 cm (frecuencia entre 10^2 y 10^9 Hz). En este intervalo encontramos las ondas largas de radio, cuyas longitudes de onda son del orden de kilómetros; las de radio AM (centenas de metro), las de FM y televisión (metros) y las de onda corta (centímetros). Se cree que son inofensivas para el ser humano.

Microondas. Comprenden el intervalo de longitudes de onda que abarca desde los 30 cm hasta 1 mm (frecuencia entre 10^9 y 3.10^{11} Hz). El rango de frecuencias de las microondas coincide con las frecuencias de resonancia de vibración de las moléculas de agua, lo que ha popularizado su empleo en las cocinas de los hogares (horno microondas) para la cocción de los alimentos (que tienen un elevado contenido de agua). Igualmente, su facilidad para penetrar en la atmósfera ha dado pie a que se utilicen en las comunicaciones con vehículos espaciales. Al tener la frecuencia de vibración del agua pueden ser peligrosas para el ser humano.

Infrarrojo (IR). Sus longitudes de onda se extienden desde 1 mm hasta los 10 m, (frecuencia entre los 3.10^{11} y los 3.10^{14} Hz). Son emitidas por cuerpos calientes, como las brasas de una chimenea. Prácticamente la mitad de la energía radiada por el Sol corresponde a este tipo de radiación.

Visible. Se llama así porque es la que nuestros ojos son capaces de captar. A este tipo de ondas es al que nos referimos comúnmente como «luz» y constituye la región más estrecha del espectro, pues abarca solo las longitudes de onda comprendidas entre 780 nm y 390 nm (frecuencias entre 3.10^{14} y 7.10^{14} Hz). Se subdivide en los colores del arco iris:

Rojo: 620 a 780 nm.

Naranja: 590 a 620 nm.

Amarillo: 550 a 590 nm.

Verde: 490 a 550 nm.

Azul: 430 a 490 nm.

Violeta: 390 a 430 nm.

Ultravioleta (UV). Son las radiaciones que se encuentran «más allá del violeta», con longitudes de onda que abarcan desde los 390 nm hasta 1 nm (frecuencias entre 7.10^{14} y 3.10^{17} Hz). Su energía es suficiente para romper enlaces químicos o producir ionizaciones. Es la responsable del tono moreno de nuestra piel al tomar el sol. Fueron descubiertas por Johann Ritter en 1881.

La región ultravioleta se divide en tres partes: UV-A, que abarca el rango de 320 nm a 390 nm; UV-B, que va de 280 nm a 320 nm, y la denominada UV-C, que corresponde a longitudes de onda inferiores a 280 nm. La intensidad de radiación UV-C que llega a la superficie de la Tierra es prácticamente nula, pues es absorbida por la capa de ozono. La radiación UV-B es también absorbida parcialmente por dicha capa, de modo que la intensidad que llega a la superficie de nuestro planeta es compatible con el desarrollo de la vida. Sin embargo, una reducción del espesor de la capa de ozono supone un aumento exponencial de la intensidad de la componente B de la radiación UV. De este modo, las dosis de radiación UV-B podrían llegar a ser dañinas para los seres vivos. En el caso del ser humano, una dosis elevada de UV-B podría afectar al sistema inmunológico, así como a la piel y a los ojos, donde puede incluso ocasionar cáncer y ceguera, respectivamente. Pero los efectos perjudiciales del exceso de esta radiación UV-B no se limitan al ser humano: también puede llegar a impedir el crecimiento de las plantas o producir daños en el plancton marino, lo que podría dar lugar a un desequilibrio ecológico importante. Muy distinta es la incidencia de los rayos UV-A, beneficiosa para la vida en el planeta. Entre sus virtudes, figura la de ser un catalizador de vitaminas y la de contribuir a la fijación del calcio en los huesos, de ahí la importancia de tomar el sol, siempre que sea de forma moderada y con niveles adecuados de radiación UV-B.

Rayos X. Sus longitudes de onda se encuentran entre 1 nm y 10^{-11} m (frecuencias entre 3.10^{17} y 3.10^{19} Hz). El tamaño de estas longitudes de onda es equiparable al de los átomos y a las distancias interatómicas en los cuerpos sólidos. Esto los ha convertido en instrumentos útiles en cristalografía para determinar las disposiciones atómicas en un cristal por el método de difracción de rayos X, así como en medicina, donde se emplean en las radiografías. Su elevada energía los hace peligrosos, por lo que las dosis aplicadas en las radiografías se miden cuidadosamente.

Rayos gamma (γ). Sus longitudes de onda van desde los 10^{-11} m hasta perderse en valores infinitesimales (frecuencias superiores a 3.10^{19} Hz). Su frecuencia es elevadísima, así como su energía, lo que hacen que sean muy peligrosos para cualquier forma de vida. Sin embargo, tienen gran utilidad en la radioterapia para combatir las células cancerosas. Las pequeñísimas longitudes de onda determinan que, en este caso, la naturaleza corpuscular prevalezca sobre la ondulatoria. Se producen en el transcurso de las reacciones nucleares y solo son absorbidos por el plomo o el hormigón de cierto grosor.

Análisis espectral.

El análisis espectral consiste en analizar el espectro de luz que se hace pasar, después de atravesar distintas sustancias a través de un prisma que produce una dispersión de la luz en sus distintas longitudes de onda. Como podemos ver en el primer dibujo, si solo pasa por el prisma luz normal, aparecen todos los colores que componen la luz blanca. Pero si esa luz se hace pasar antes de entrar en el prisma a través de un tubo que contiene una sustancia, por ejemplo hidrógeno, lo que vemos es el espectro pero con unas líneas oscuras, es el espectro de absorción. Si lo que hacemos es tener el hidrógeno en el tubo y le aplicamos descargas eléctricas, éste emite una pequeña cantidad de luz que al hacerla pasar por el prisma nos permite ver el llamado espectro de emisión, que consiste en unas cuantas líneas de luz claras.

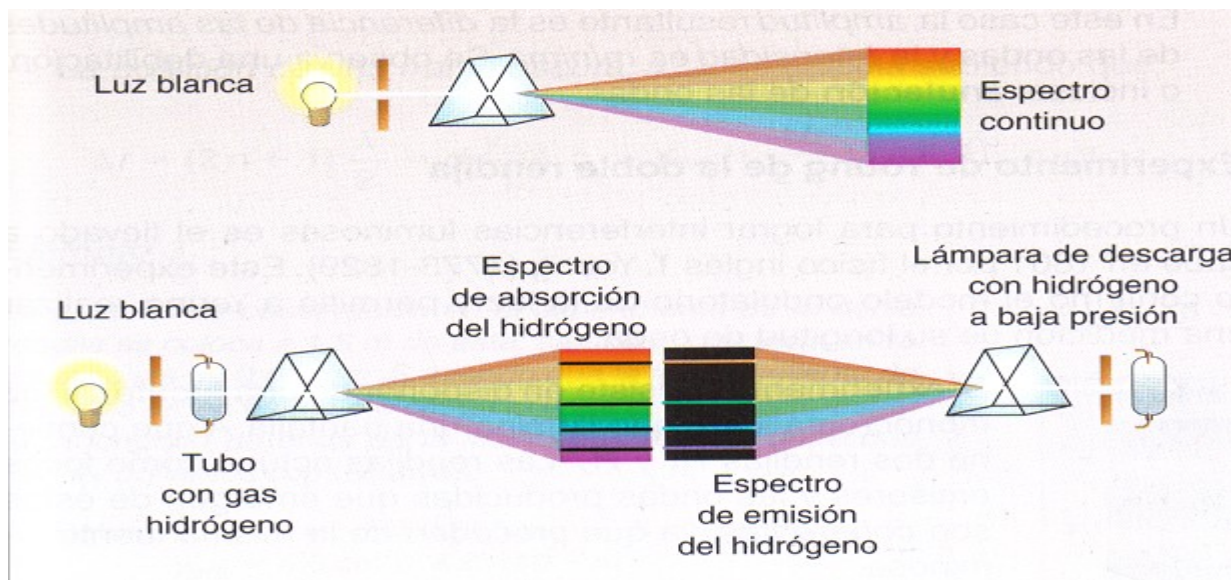
Lo que ocurre en el espectro de absorción es que las moléculas de hidrógeno absorben determinados fotones, estos fotones tienen la energía exacta para hacer que los electrones salten de estado energético bajos a otros más altos, por eso faltan esos fotones en el espectro y tenemos unas líneas oscuras. En el espectro de emisión es lo contrario, con las descargas eléctricas los electrones pasan a niveles energéticos altos y, pasado algún tiempo, regresan a los niveles bajos, por lo que emiten fotones con la energía que les "sobra". Así lo que vemos es unas cuantas líneas de color, las de los electrones emitidos. Es importante decir que ambos espectros son iguales pero contrarios, las líneas de luz que faltan en el espectro de absorción son las que se ven en el de emisión. Uno es como el negativo del otro.

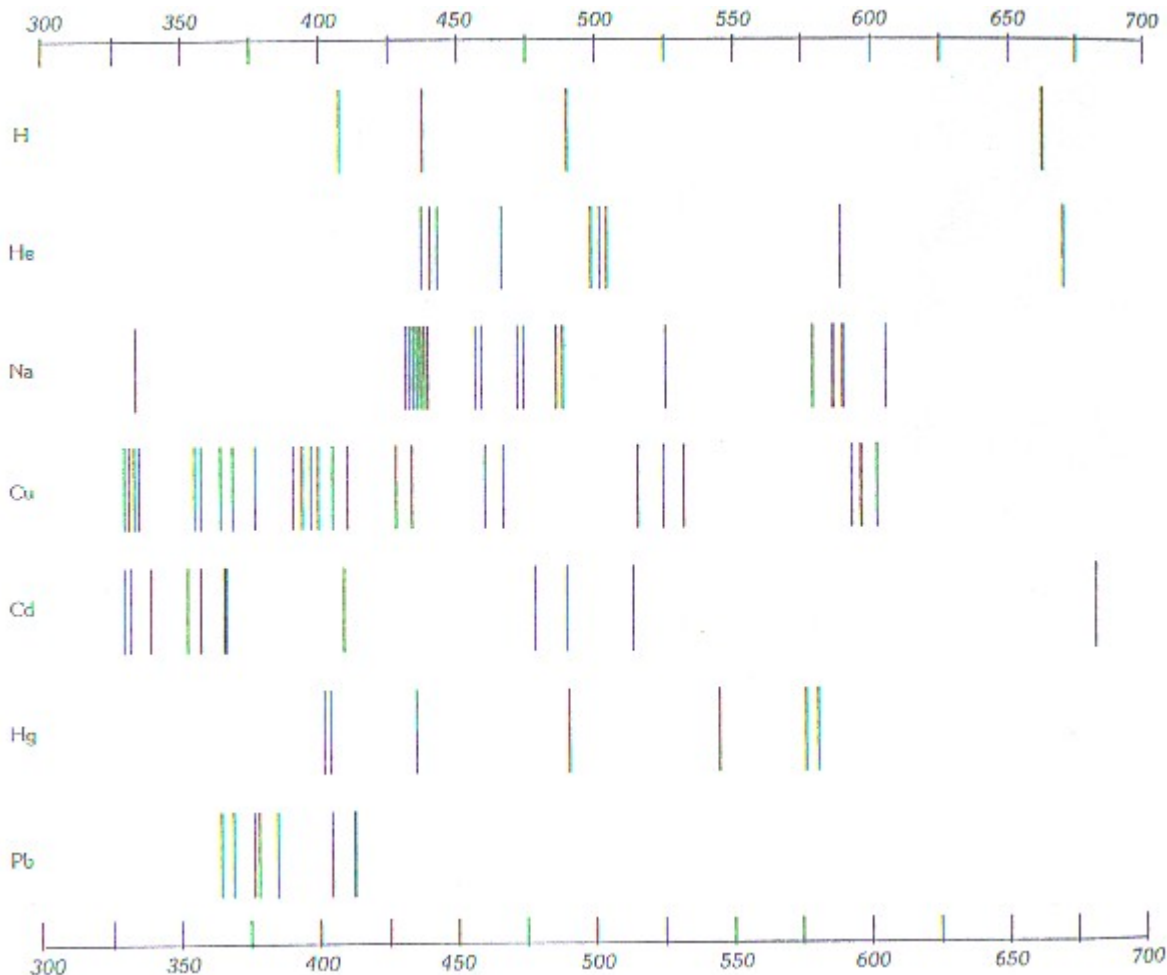
En la segunda imagen vemos los espectros de distintas sustancias. Una propiedad de los espectros es que, como se puede ver, son distintos para distintas sustancias. Esto se debe a que cada sustancia tiene distintos niveles energéticos por lo que los fotones son de distinta energía, o lo que es lo mismo, de distinta longitud de onda por lo que aparecen en distinta posición. También podemos ver que para cuantos más electrones tiene las sustancias, por lo general, los espectros son más "complicados", esto es por lo mismo, al tener más electrones aparecen muchos niveles energético nuevos lo que se traduce en nuevas líneas.

Debido a que cada sustancia tiene un espectro distinto, éste es como su "firma", lo que permite saber, a partir de un espectro, que sustancia hay en él. Por ejemplo el análisis espectral de la luz procedente de estrellas y galaxias ha permitido averiguar su composición lo que ha sido de gran ayuda en el estudio de la cosmología y del origen y evolución del universo.

Los ejemplos de espectros del gráfico se corresponden con átomos individuales, no forman moléculas, por eso aparecen líneas y se llaman espectro de líneas. Cuando lo que se estudia son moléculas, entonces lo que aparecen no son líneas, sino una serie de bandas más o menos grandes, esto se debe a que en las moléculas aparecen muchos niveles energéticos nuevos muy cercanos unos a otros, tanto que no se pueden distinguir por lo que se unen de forma que vemos una banda y no una línea definida. Estos dos tipos de espectros, de líneas y de bandas se llaman discontinuos porque, sean líneas o bandas, están separados lo que nos permite estudiarlos.

Pero existen los llamados espectros continuos, en los que nos es posible separar ni líneas ni bandas, por lo que no es posible distinguir de qué está formada la sustancia a analizar. Estos espectros suelen aparecer en sólidos, en líquidos y en algunas moléculas grandes. Esto es debido a que hay tantos niveles energéticos que ya no es posible separarlos para su estudio con detalle.





Concepto de onda. Clasificación de las ondas.

Para transferir energía desde un punto a un cuerpo distante podemos utilizar otro cuerpo portador: por ejemplo, la bola que golpea a los bolos que se hallan en reposo. Pero también es posible transferirla de otra manera: una piedra cae en agua y, al cabo de un tiempo, un objeto que flota a cierta distancia comienza a moverse oscilando de arriba abajo. En este caso no ha sido necesario que la piedra golpee directamente al objeto y, sin embargo, se ha transferido igualmente energía. Este segundo movimiento, en el que no se propaga materia pero sí energía, es el que conocemos como movimiento ondulatorio o de propagación de la onda.

Vamos a definir una onda como: el movimiento de propagación de una perturbación de un punto a otro sin que exista transporte neto de materia pero sí de energía.

Vamos entonces a clasificar las ondas de tres formas según el tipo, las dimensiones y la dirección de vibración.

Según el tipo de onda tenemos:

- Ondas mecánicas. Son aquellas que necesitan un medio material para transmitirse. Un ejemplo de ondas mecánicas es el sonido, que necesita un medio para su propagación sea este sólido, líquido o gaseoso; pero que no se transmite a través del vacío.
- Ondas electromagnéticas. Son aquellas que no requieren un medio material para su propagación y pueden transmitirse en el vacío. A este tipo pertenecen las ondas del espectro electromagnético.

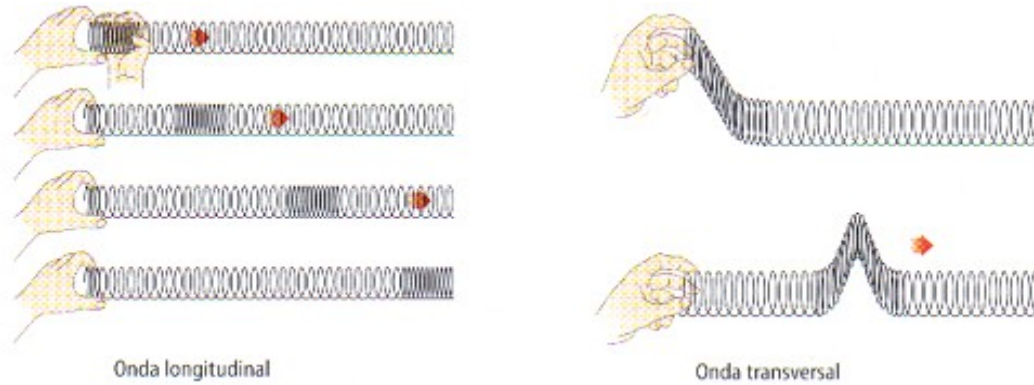
Según el número de dimensiones de propagación tenemos:

- Unidimensionales. Si se propaga en una única dirección, como por ejemplo una onda en una cuerda.
- Bidimensionales. Si se propagan en dos direcciones, por ejemplo las ondas de agua en un estanque.
- Tridimensionales. Si se propagan en tres dimensiones. Sería, por ejemplo, el caso del sonido, la luz y las radiaciones electromagnéticas en general.

Según la dirección de propagación de la onda tenemos:

- a) Longitudinales. Si la dirección de la vibración y de la propagación coinciden. Un ejemplo es el sonido.
- b) Transversales. Si la dirección de la vibración y de la propagación son perpendiculares. Por ejemplo, las ondas que se propagan en una cuerda pueden ser transversales. Pero las más importantes son las ondas electromagnéticas, en las que la propiedad perturbada, como ya hemos dicho, es el campo eléctrico y el magnético. En el dibujo de la primera página se ve claramente este caso.

Vemos en estos dibujos un ejemplo de onda longitudinal y otro de onda trasversal.



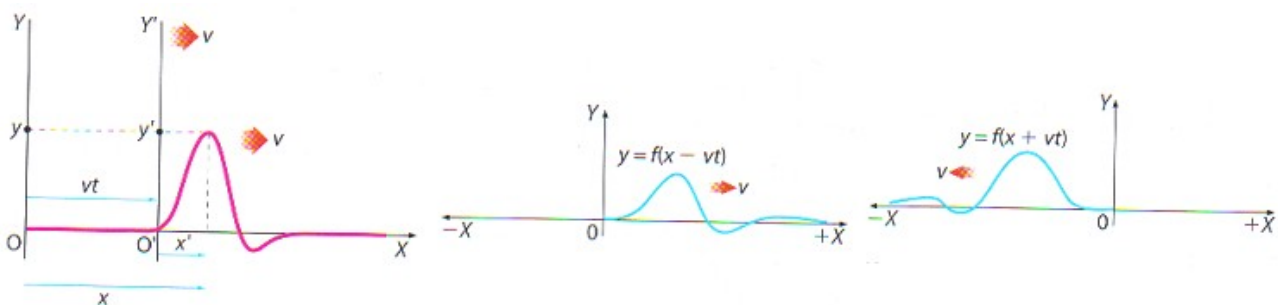
Ecuación de una onda.

Una onda es una perturbación que se propaga en el espacio y en el tiempo, por tanto la ecuación de una onda debe ser una función matemática de la posición y del tiempo, es decir, tiene la forma: **y = f(x, t)**

Para ver como se relacionan las variables x y t en la ecuación, analizaremos el movimiento de una onda que se mueve hacia la derecha, visto desde dos sistemas de referencia distintos: uno fijo, O, y otro, O', que avanza con el pulso y con su misma velocidad. Para alguien situado en el sistema O, los valores de y dependen de x y t; pero para alguien que se mueve con la onda, los valores de y' solo son función de x', pues para él la onda permanece estática. Sin embargo en los dos casos se está describiendo la misma onda, por lo que: **f(x, t) = f(x')**

Podemos ver en el dibujo de abajo a la izquierda, que las coordenadas de los dos sistemas de referencia se relacionan con la ecuación: **x' = x - v.t** donde v es la velocidad de propagación de la onda, por tanto la ecuación de la onda que se desplaza hacia la derecha tiene la forma: **y = f(x - v.t)** Si la onda se desplaza hacia la izquierda entonces su ecuación tiene la forma: **y = f(x + v.t)**

En los dibujos del centro y de la derecha podemos ver los dos casos.



De todas las posibles ecuaciones de onda tienen mucho interés las llamadas ondas armónicas, que son producidas por movimientos periódicos. Este interés se debe a que, en muchos casos, otras funciones de onda se pueden escribir como sumas algebraicas de funciones armónicas. Las ecuaciones de onda de funciones armónicas son funciones de senos y cosenos, es decir, tienen la forma:

y = A sin(k.(x ± v.t)) **y = A cos(k.(x ± v.t))**

Parámetros de las ondas.

Veamos ahora algunos parámetros importantes de las ondas y las ecuaciones que los relacionan:

- Amplitud (A): es el valor máximo de la elongación, es decir, la distancia de un máximo de la onda al eje X. Se mide en metros.
- Longitud de onda (λ): Es la distancia entre dos puntos consecutivos que se encuentran en idéntico estado de perturbación, por ejemplo entre dos máximos de la onda. También se mide en metros.
- Período (T). Es el tiempo que tarda la onda en recorrer una longitud de onda. Se mide en segundos.
- Frecuencia (f): es el número de vibraciones que produce la onda cada segundo, es la inversa del período y se mide en $\text{hz} = \text{s}^{-1}$. $f = 1/T$
- Velocidad de propagación (v): es la velocidad a la que viaja la onda, como la velocidad es el espacio dividido entre el tiempo, y el tiempo que la onda tarda en recorrer una longitud de onda (λ) es el período, entonces podemos escribir: $v = s/t = \lambda/T = \lambda \cdot f$
- Número de onda (k): se define como el número de longitudes de onda que hay en una distancia de 2π . Es decir: $K = 2\pi/\lambda$
- Frecuencia angular (w): es el número de períodos que hay en 2π segundos. Es decir: $w = 2\pi/T = 2\pi \cdot f$

Hay algunas ecuaciones que relacionan estos parámetros que son interesantes:

De la velocidad podemos despejar $\lambda = v \cdot T$ y como $K = 2\pi/\lambda$ sustituimos la anterior ecuación en esta y obtenemos: $k = 2\pi/v \cdot T$ pero también sabemos que $w = 2\pi/T$ y por lo tanto llegamos a que $k = w/v$

Ahora que conocemos los parámetros más importantes de la onda podemos ver otras formas distintas de escribir la ecuación de una onda, es importante señalar que todas son equivalentes y que unas pueden obtenerse de las otras utilizando las relaciones entre los parámetros. Vamos a verlo con la función seno, para la función coseno sería igual.

$$y = A \sin(k \cdot (x - v \cdot t)) \quad \text{de aquí tenemos:} \quad y = A \sin(k \cdot x - kv \cdot t) \quad \text{de donde:}$$
$$y = A \sin(k \cdot x - w \cdot t) \quad \text{como sabemos que} \quad K = 2\pi/\lambda \quad \text{y que} \quad w = 2\pi/T \quad \text{entonces}$$

sustituyendo en la última ecuación obtenemos: $y = A \cdot \sin \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \right]$

Se podrían tener más ecuaciones de onda diferentes combinando los parámetros, pero estas tres son las más comunes y son las que vamos a utilizar nosotros.