

TEMA 7. ÓPTICA FÍSICA.

ÍNDICE

- 1. Evolución histórica del estudio de la naturaleza de la luz.**
- 2. Ondas electromagnéticas.**
 - 2.1. Definición de onda electromagnética.
 - 2.2. Propagación de las ondas electromagnéticas.
 - 2.3. Producción de ondas electromagnéticas.
 - 2.4. El espectro electromagnético.
- 3. Características de la luz.**
 - 3.1. Propagación de la luz.
 - 3.2. La velocidad de la luz.
 - 3.2.1. Índice de refracción.
 - 3.2.2. Propagación en medios materiales.
- 4. Reflexión y refracción de la luz.**
 - 4.1. Reflexión.
 - 4.2. Refracción.
 - 4.3. Ángulo límite.
- 5. Fenómenos lumínicos.**
 - 5.1. Difracción.
 - 5.2. Espectroscopía
 - 5.3. Dispersión.
 - 5.3.1. ¿Por qué los atardeceres son rojos?
 - 5.4. Polarización.
 - 5.5. Efecto Doppler.
- 6. Estudio del color.**

1. Evolución histórica del estudio de la naturaleza de la luz.

Desde antiguo, se ha preocupado el hombre por conocer la naturaleza de la luz y en general de la radiación. La historia de la evolución del pensamiento acerca de esta cuestión es una de las más apasionantes de la ciencia, por eso la exponemos como ejemplo de construcción de un hecho científico.

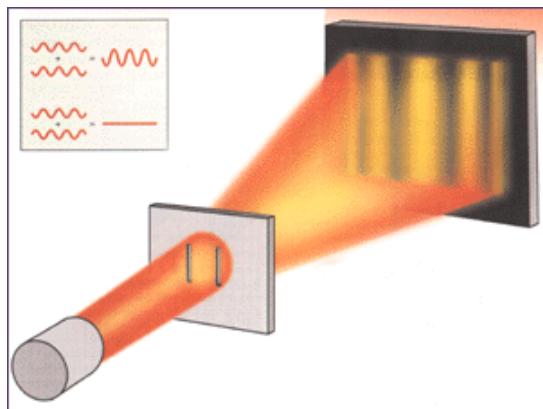
Dos hipótesis contradictorias, sobre la naturaleza de la luz, han mereciendo la atención de los científicos a lo largo de muchos años sin que ninguna de ellas llegara a aceptarse como definitiva. Son la teoría ondulatoria y la teoría corpuscular.

Según la teoría ondulatoria, la luz es una perturbación de carácter ondulatorio (onda) que se propaga desde un foco luminoso a través del medio. Según la teoría corpuscular la luz está constituida por pequeñas partículas o corpúsculos desde el foco radiante al observador a través del medio. Las dos teorías tuvieron un desarrollo paralelo e independiente a lo largo de muchos años.

La teoría ondulatoria fue utilizada por Christian Huygens (siglo XVII) para explicar los fenómenos de propagación, reflexión, refracción y doble refracción de la luz en los medios transparentes. Para Huygens la luz es una onda mecánica que se propaga en un medio elástico ideal (éter) existente tanto en el interior de los cuerpos

materiales como en vacío interestelar. Su mayor rival fue Isaac Newton, el cual defendía la teoría corpuscular, que se impuso debido al enorme prestigio que poseía este científico inglés. La teoría corpuscular sostiene que la luz está formada por minúsculas partículas, llamadas corpúsculos, que son lanzados a gran velocidad desde el emisor y que son distintos para cada color.

A pesar de conseguir algunos éxitos, la teoría corpuscular no explicaba satisfactoriamente algunos fenómenos que ya se conocían experimentalmente como, por ejemplo, la doble refracción.

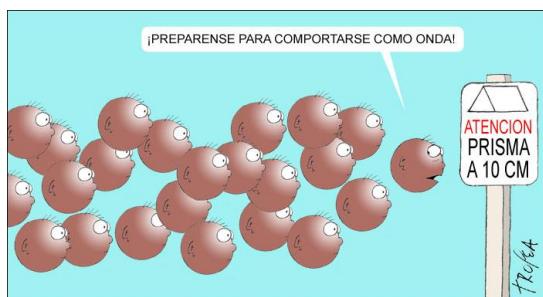


Experimento de la doble rendija, que demuestra la naturaleza ondulatoria de la luz. El experimento de la doble rendija puede recrearse en la siguiente [simulación](#)

Pese a este tipo de problemas, la teoría corpuscular se impuso hasta principios del siglo XIX cuando un físico inglés Thomas Young explica el fenómeno de la difracción de la luz sobre la base de la naturaleza ondulatoria de la luz que no eran explicados satisfactoriamente mediante la teoría corpuscular.

El desarrollo del electromagnetismo iniciado por Oersted y sintetizado por el matemático escocés James Clerk Maxwell las evidencias a favor de la teoría ondulatoria eran muy numerosas. Sin embargo, fenómenos como el Efecto Fotoeléctrico, el Efecto Compton y los Espectros de Radiación en forma de líneas discretas emitidos por los átomos a altas temperaturas obligaron a revisar la teoría ondulatoria.

Desde principios del siglo XX se acepta la doble naturaleza de la luz, en el cual la luz se comporta como una onda y una partícula según el experimento al que esté sometido. Se profundizará en este concepto en temas posteriores.

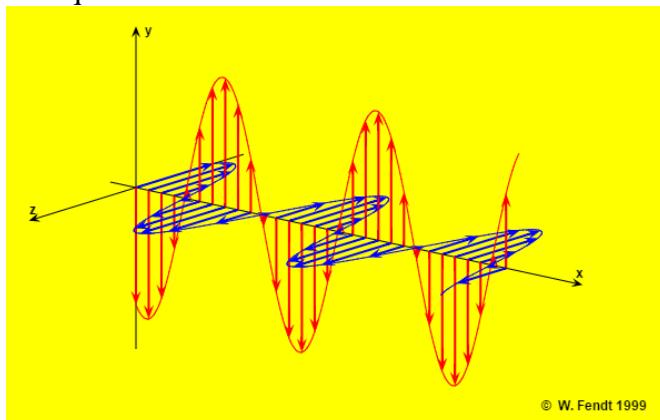


Fuente: www.lacienciaconhumor.blogspot.com.

2. Ondas electromagnéticas

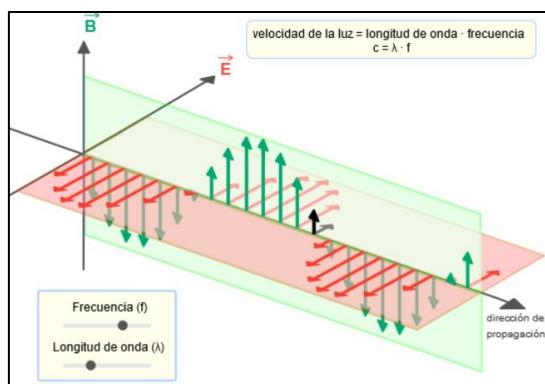
2.1 Definición de onda electromagnética.

Ya se ha comentado en el Tema 1 que las ondas electromagnéticas son aquellas que no necesitan de un medio material para su propagación, con lo que se pueden propagar en el vacío. Están compuestas de un campo eléctrico \vec{E} y un campo magnético \vec{B} , ambos perpendiculares entre si y a su vez perpendiculares a la velocidad de propagación, por lo que se trata de ondas transversales.



Esquema de una onda electromagnética. Los vectores del **campo eléctrico** (en rojo) son paralelos al eje y, los vectores del **campo magnético** (en azul) son paralelos al eje z. Fuente <http://www.walter-fendt.de>

Como cualquier onda, las ondas electromagnéticas se caracterizan por su amplitud, periodo y frecuencia.



Fuente: www.educapplus.org

2.2 Propagación de las ondas electromagnéticas

Una carga eléctrica al ser acelerada, crea a su alrededor un campo electromagnético variable. Si aceptamos la existencia de un valor para el campo electromagnético incluso en el vacío, una modificación del mismo en un punto producirá modificaciones a su alrededor, transmitiéndose la perturbación electromagnética.

La velocidad con que se propaga esta perturbación depende de la constante dieléctrica (ϵ) y de la permeabilidad magnética (μ) del medio. Para el vacío:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Del dibujo anterior se observa que el campo magnético y el campo eléctrico están en fase. Además, los módulos no son independientes, sino que están relacionados mediante la expresión $E = c \cdot B$, siendo c la velocidad de propagación en el vacío.

Como cualquier onda, transportan energía que pueden transferir a los cuerpos de su entorno. Las ecuaciones de los campos eléctrico y magnético son las que corresponden a una onda armónica unidimensional:

$$E_x(x, t) = E_0 \cdot \sin \left[2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \right] = E_0 \cdot \sin(w \cdot t - \kappa \cdot x)$$

$$B_x(x, t) = B_0 \cdot \sin \left[2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \right] = B_0 \cdot \sin(w \cdot t - \kappa \cdot x)$$

2.3 Producción de ondas electromagnéticas

Las ondas electromagnéticas se producen siempre que una partícula cargada, y por lo tanto, una corriente eléctrica, esté sometido a aceleración. En la siguiente [simulación](#) se pueden generar ondas electromagnéticas acelerando una carga.

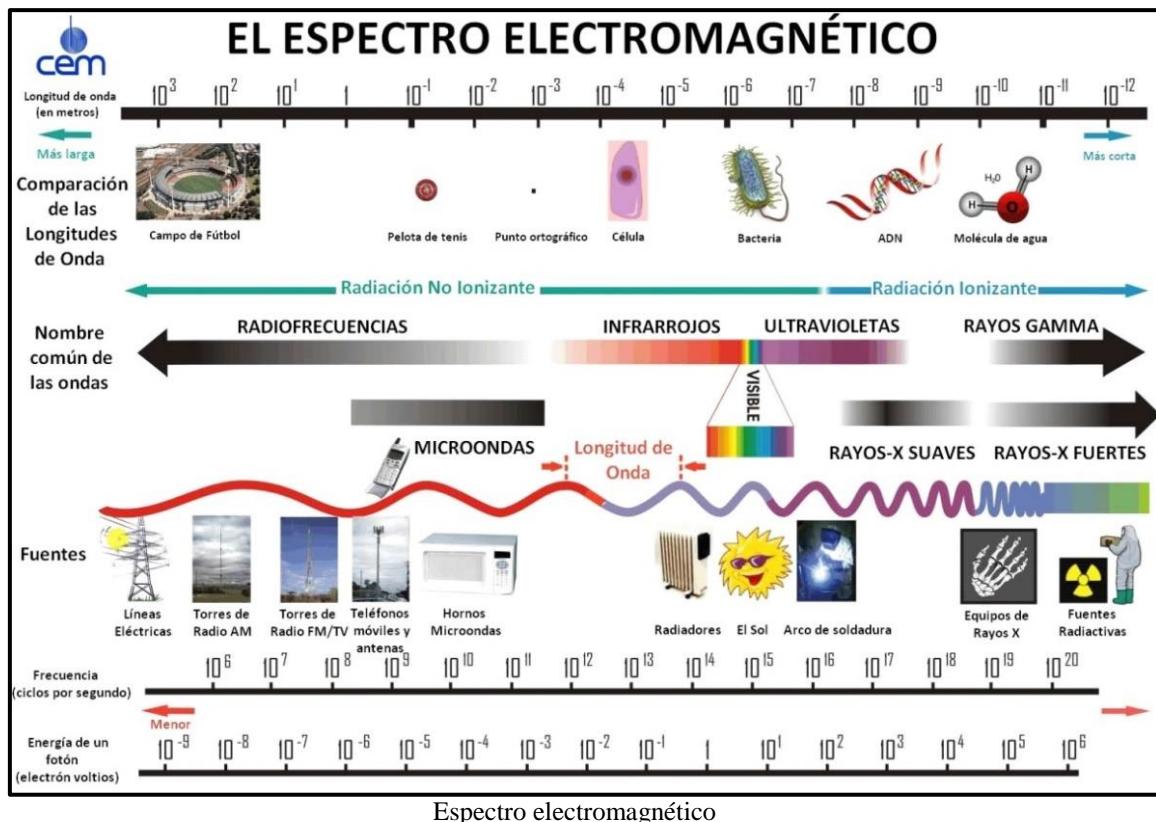
Las ondas electromagnéticas se pueden propagar por cualquier medio material o por el vacío. Como ya se ha comentado en temas anteriores, una onda es un transporte de energía. Esa energía transportada depende de la velocidad y la fuerza con la que movemos la partícula, y de la amplitud o distancia entre el inicio y el final del recorrido. Cuanto mayor sea esta amplitud y la frecuencia, más energética será la onda producida. En la siguiente [simulación](#) se puede recrear la creación de ondas de radio.

2.4 El espectro electromagnético

Se llama espectro electromagnético al conjunto ordenado de las diferentes longitudes de onda en que se puede descomponer la radiación electromagnética.

De la imagen mostrada, se deduce que a mayor frecuencia mayor energía y a menor longitud de onda menor energía. Esto es porque, a igualdad de amplitud, la energía de una onda electromagnética aumenta con la frecuencia. Suponiendo que la onda electromagnética se propaga en el vacío, la frecuencia y la longitud de onda se relaciona mediante:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

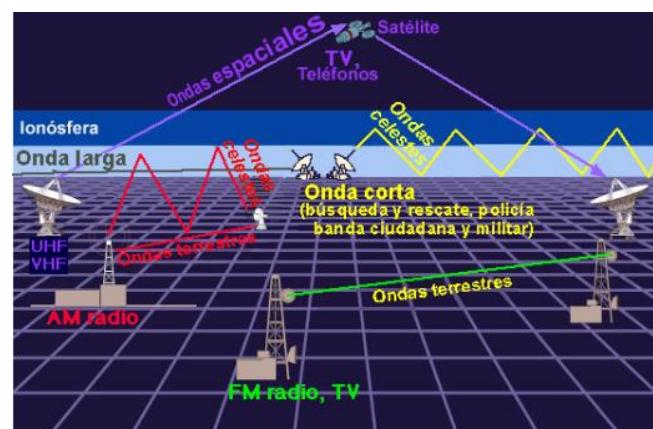


Espectro electromagnético

Según el mecanismo de obtención de ondas, el espectro electromagnético se clasifica en una serie de rangos de frecuencia o longitudes de onda, que se distinguen entre sí por sus características y propiedades, aunque no existe entre ellos una división o frontera clara sino un solapamiento de estos rangos.

Los distintos rangos del espectro electromagnético los describiremos a continuación según frecuencias (o energías) crecientes o longitudes de onda decrecientes:

- **Radioondas** ($\lambda=10$ Km a $\lambda=10$ m). Son producidas por circuitos eléctricos oscilantes y se aplican fundamentalmente en comunicaciones y en investigaciones astrofísicas. Sufren reflexión en la ionosfera (capa atmosférica de iones situada entre 60 y 300 km de altura) Se clasifican, de mayor a menor en: largas, medias y cortas.
- **Ondas Ultracortas** ($\lambda=10$ m a $\lambda=1$ cm). Son producidas igualmente por circuitos eléctricos oscilantes. Son utilizadas en las transmisiones de televisión, porque tienen mayor energía. Se clasifican, de mayor a menor λ en:
 - VHF ondas métricas $\lambda \approx 1$ m
 - UHF ondas decimétricas $\lambda \approx 1$ dm
 - SHF ondas centimétricas $\lambda \approx 1$ cm



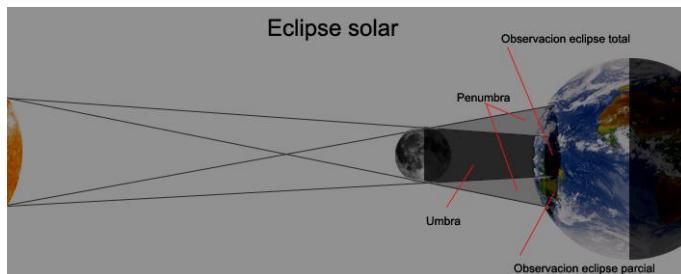
- **Microondas** ($\lambda=1$ cm a $\lambda=0,1$ cm). Son generadas por dispositivos electrónicos oscilantes y se utilizan en radar, comunicaciones e investigaciones astrofísicas.
- **Infrarrojo** ($\lambda=0,1$ cm a $\lambda=780$ nm). Son producidas por las oscilaciones térmicas de los cuerpos, o sea, es la radiación que emite todo cuerpo debido a la agitación molecular que posee al encontrarse a una temperatura T superior al 0 K.
- **Espectro visible** ($\lambda=780$ nm a $\lambda=390$ nm). Es el rango más estrecho y constituye la luz, zona del espectro electromagnético que sensibiliza las células de la retina del ojo humano y da sensación de visión cromática. Ciertos rangos de frecuencias individualizadas dan sensación de color y son los siguientes:
 $\lambda=780$ nm a $\lambda=622$ nm Rojo.
 $\lambda=622$ nm a $\lambda=597$ nm Naranja.
 $\lambda=597$ nm a $\lambda=577$ nm Amarillo.
 $\lambda=577$ nm a $\lambda=492$ nm Verde.
 $\lambda=492$ nm a $\lambda=455$ nm Azul.
 $\lambda=455$ nm a $\lambda=390$ nm Violeta.
- **Ultravioleta** ($\lambda=390$ nm a $\lambda=0'6$ nm). Constituye una amplísima gama del espectro solapada con la siguiente (rayos X). Se originan por descargas eléctricas en gases enrarecidos, lo que da lugar a oscilaciones moleculares. Es muy abundante en el Universo, pues la emiten en grandes cantidades el Sol y las estrellas, pero a la Tierra no llega pues es detenida y absorbida por la Ozonosfera (capa de la atmósfera rica en ozono) y evita que alcance la superficie en dosis perjudiciales a los organismos vivos. Tiene acciones importantes sobre el material genético celular produciendo roturas y mutaciones en las cadenas de ácidos nucleicos.
- **Rayos X** ($\lambda=1$ nm a $\lambda=6$ pm). Descubiertos por Roentgen en 1895, también constituyen un amplísimo rango de frecuencias que se solapa con los rayos γ . Se producen debido a las oscilaciones atómicas originadas por el choque de electrones en superficies metálicas. Se clasifican según su λ en: Muy blandos, Blandos, Medios, Duros y Muy Duros. Los primeros se utilizan en Radiología y Medicina y los últimos se utilizan en la investigación de estructuras cristalinas y metálicas.
- **Rayos γ** ($\lambda=100$ pm a $\lambda=0'01$ pm). Constituye la última gama del espectro electromagnético. Son producidos por oscilaciones atómicas y nucleares. Se originan en los procesos de desintegración radiactiva y se encuentran en gran abundancia en ciertos conglomerados estelares. Se utilizan en medidas y análisis de estructuras cristalinas por difracción y son objeto de investigaciones astrofísicas.

3. Características de la luz.

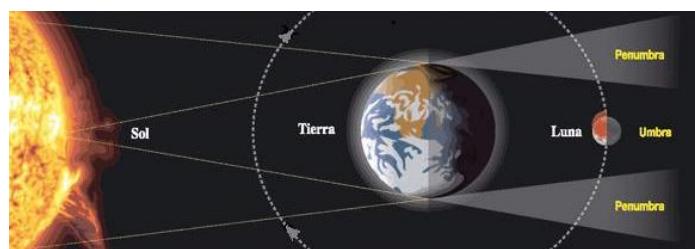
3.1 Propagación de la luz.

La luz en un medio homogéneo e isótropo se propaga siguiendo trayectorias rectilíneas que se denominan rayos luminosos. De esta manera, teniendo en cuenta que la luz es un rango del espectro electromagnético, un rayo luminoso es una línea imaginaria perpendicular al frente de onda que definen los campos eléctrico y magnético.

La propagación rectilínea de la luz se comprueba fácilmente mediante la observación de sombras que se trataría de una región donde la luz ha sido obstaculizada por un objeto opaco (mirar [simulación](#)). Esto ocurre si el foco es puntual. Si no es puntual se observa además una zona que rodea a esta y que se denomina penumbra. La formación de estas zonas de sombra y de penumbra nos permite entender los eclipses de Sol y de Luna.



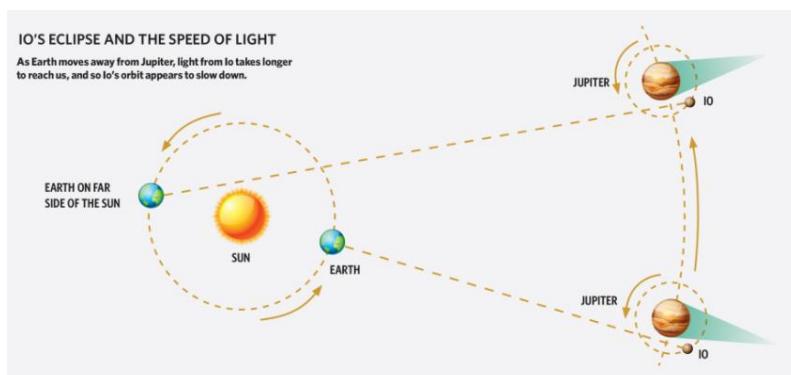
Esquema de un eclipse de Sol. Fuente: www.akelu.net.



Esquema de un eclipse lunar. Fuente: bitactoradegalileo.wordpress.com

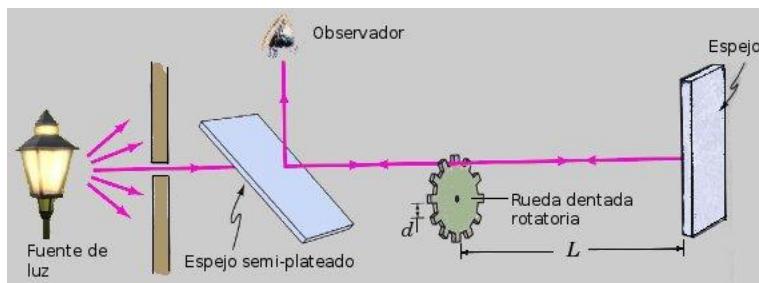
3.2 La velocidad de la luz.

La luz es una onda electromagnética con una longitud de onda descrita en el apartado anterior. La primera indicación del verdadero valor de la velocidad de la luz procedió de observaciones astronómicas basadas en la medida del período de Io, una de las lunas de Júpiter. Este período se determina midiendo el tiempo entre dos eclipses de dicha luna con el planeta. El período del eclipse es, aproximadamente 42'50 horas, pero cuando se hacen medidas en el momento en que la Tierra se está alejando de Júpiter, se tienen unas medidas de tiempo mayores para este período que cuando las medidas se hacen en las posiciones en que la Tierra se acerca hacia Júpiter. Como estas medidas difieren del valor medio en sólo aproximadamente en 15 segundos, estas discrepancias eran a su vez difíciles de medir con exactitud. El primero que las llevo a cabo fue, en 1675, el astrónomo danés O. Roemer.



Método de O. Roemer para medir la velocidad de la luz.

La primera medida no astronómica de la velocidad de la luz fue realizada por el físico francés Fizeau en 1849. Tal y como se muestra en la imagen.



Método de Fizeau para medir la velocidad de la luz.

La luz procedente de la fuente atraviesa el espejo semitransparente y se transmite a través de uno de los huecos de una rueda dentada hasta llegar al espejo. Tras reflejarse en ese espejo, la luz regresa por el mismo camino y tras ser reflejado en el primer espejo se detecta por el observador. Se determina la velocidad de la luz midiendo la velocidad angular de la rueda que permitirá que la luz reflejada sea transmitida por el hueco siguiente de la rueda dentada de modo que se obtenga una imagen de la fuente.

El método más exacto para determinar la velocidad de la luz es considerarla como una onda electromagnética. La velocidad de las ondas electromagnéticas en el vacío está relacionada con una constante eléctrica y con una constante magnética que pueden determinarse experimentalmente. El valor se obtiene utilizando la fórmula del Apartado 2.2.

3.2.1 Índice de refracción.

El valor de la velocidad de la luz varía para cada medio, siendo su valor máximo en el vacío. A fin de relacionar la velocidad de la luz en un medio cualquiera con la velocidad de la luz en el vacío se define un valor, llamado índice de refracción absoluto, que viene dado por la expresión:

$$n = \frac{\text{velocidad de la luz en el vacío}}{\text{velocidad de la luz en el medio}}$$

Esta magnitud es característica de cada medio.

De la expresión se deduce que su valor es siempre superior a uno. Además, cuanto mayor es el índice de refracción de un medio, menor es la velocidad con que la luz se propaga en él. Si un medio tiene un índice de refracción mayor que otro se dice que es más refringente.

3.2.2 Propagación en medios materiales

Como se vio en el tema de ondas, la frecuencia de una onda depende sólo del foco emisor, de tal manera que si la luz pasa de un medio a otro su frecuencia no cambia, pero si su longitud de onda.

Utilizando la relación entre la velocidad, la frecuencia y la longitud de onda y se compara con la definición de índice de refracción, se comprueba fácilmente que cuando

una luz pasa de un medio a otro más refringente su velocidad disminuye, y por tanto tiene una longitud de onda menor.

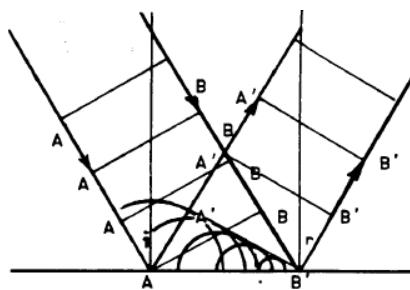
$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{c/v_2}{c/v_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\nu \cdot \lambda_1}{\nu \cdot \lambda_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

Para una frecuencia determinada los índices de refracción de ambos medios son inversamente proporcionales a las velocidades y, por tanto, a las longitudes de onda de cada uno de esos medios.

4. Reflexión y refracción de la luz.

4.1 Reflexión.

Se define reflexión como el fenómeno físico por el que una onda cuando incide sobre una superficie de separación de dos medios, es devuelta parcial o totalmente al primer medio con un cambio de dirección.



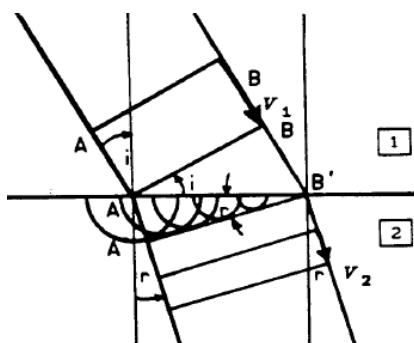
Las leyes de la reflexión son las siguientes:

- El rayo incidente, la normal a la superficie en el punto de incidencia y el rayo reflejado están en el mismo plano.
- Los ángulos de incidencia i , y de reflexión, r , son iguales.

Estos principios se establecen como consecuencia de la aplicación del principio de Huygens al fenómeno de la reflexión.

4.2 Refracción.

Se define refracción al cambio en la dirección de propagación que experimenta una onda al pasar de un medio al otro diferente, en el cual la onda se propaga con diferente velocidad al primero.



Las leyes de la reflexión son las siguientes:

- El rayo incidente, el rayo refractado y la recta normal a la superficie están en el mismo plano.
- La relación que hay entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción es la misma que hay entre las velocidades de propagación de la onda en los dos medios:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} = cte$$

Esta expresión se conoce como ley de Snell y suele expresarse como:

$$n_1 \cdot \sin i = n_2 \cdot \sin r$$

Cuando la luz pasa de un medio a otro cuyo índice de refracción es mayor, por ejemplo del aire al agua, los rayos refractados se acercan a la normal y se alejan en caso contrario.

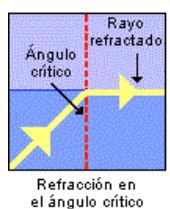
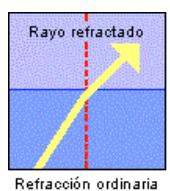


Imagen ilusoria creada por el fenómeno de refracción

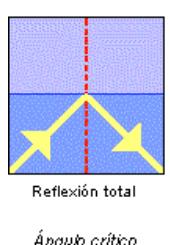
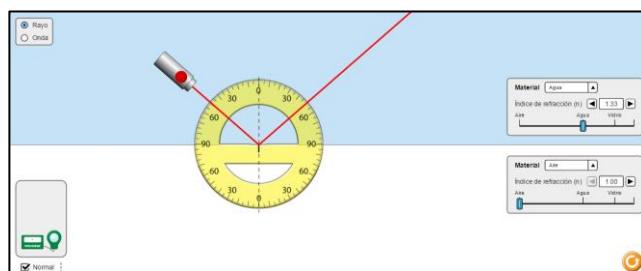
En la siguiente [simulación](#) se pueden visualizar los fenómenos de la reflexión y la refracción según el principio de Huygens.

4.3. Reflexión total. Ángulo límite.

Como ya se ha comentado, cuando la luz pasa de un medio a otro cuyo índice de refracción es mayor los rayos refractados se acercan a la normal. Si el índice de refracción del segundo medio es menor los rayos refractados se alejan de la normal.



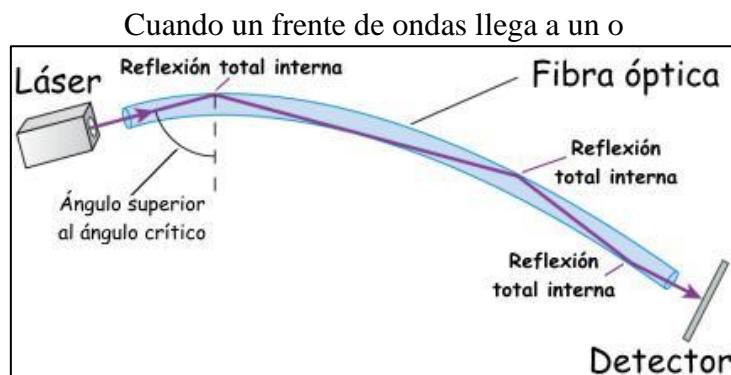
Si consideramos que $n_1 > n_2$ y aumentamos el ángulo de incidencia, llega un momento en que el ángulo de refracción se hace igual a 90° , lo que significa que desaparece el rayo refractado. Como el seno de 90° es uno el ángulo de incidencia para el cual ocurre este fenómeno viene dado por $\alpha_c = n_2 / n_1$.



En la [simulación](#) se observa como el rayo luminoso se refleja totalmente cuando este pasa del agua ($n=1,33$) al aire ($n=1$).

Este ángulo de incidencia, α_c recibe el nombre de ángulo crítico, ya que si aumenta más el ángulo de incidencia, la luz comienza a reflejarse íntegramente, fenómeno que se conoce como reflexión total.

Una aplicación de la reflexión total es la fibra óptica, que es una fibra de vidrio, larga y fina en la que la luz en su interior choca con las paredes en un ángulo superior al crítico de manera que la energía se transmite sin apenas perdida. También los espejismos son un fenómeno de reflexión total.



Funcionamiento de la fibra óptica mediante el fenómeno de la reflexión total. Fuente: www.elfisicocoloco.blogspot.com.es

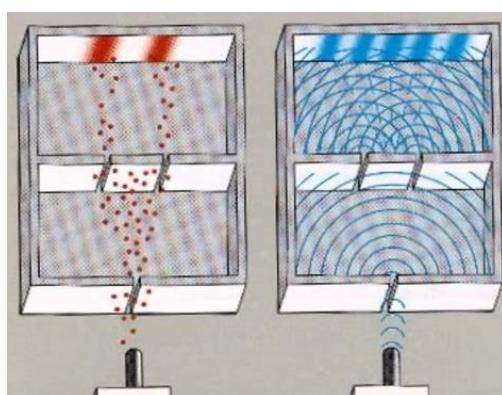
Estos fundamentos se pueden observar en el siguiente [vídeo](#).

5. Fenómenos lumínicos.

5.1. Difracción.

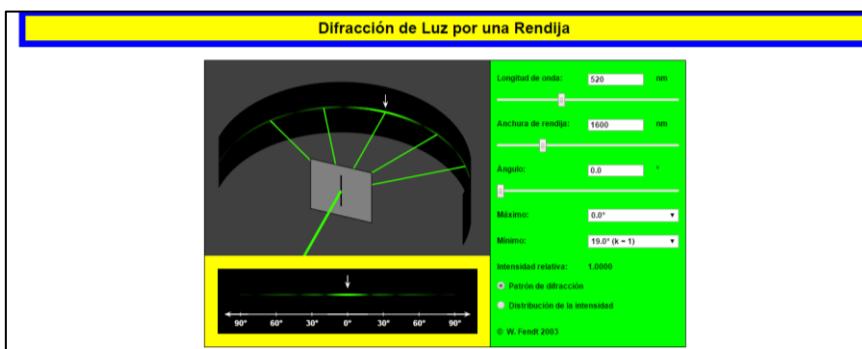
Como se explicó en el Tema 2, la difracción es un fenómeno por el cual una onda se reproduce al atravesar una rendija u orificio. Este fenómeno sólo tiene lugar cuando el tamaño de la abertura o rendija es del mismo orden que la longitud de onda, λ , del movimiento ondulatorio.

Dado que la luz se comporta como una onda ante determinados fenómenos, la luz experimenta también el fenómeno de la difracción cuando la rejilla es del tamaño adecuado. Si la luz se comportara tuviera el comportamiento de corpúsculo, no experimentaría dicho fenómeno tal y como se ilustra en la figura:



Explicación visual de porque la difracción es un fenómeno que sólo puede ser explicado desde la teoría ondulatoria. Fuente: www.fisicabf.blogspot.com.

En la siguiente [simulación](#) se puede observar el fenómeno de difracción de la luz y como se crean franjas con zonas de máxima intensidad lumínica y nula intensidad lumínica.



Fuente: http://www.walter-fendt.de/html5/phes/singleslit_es.htm

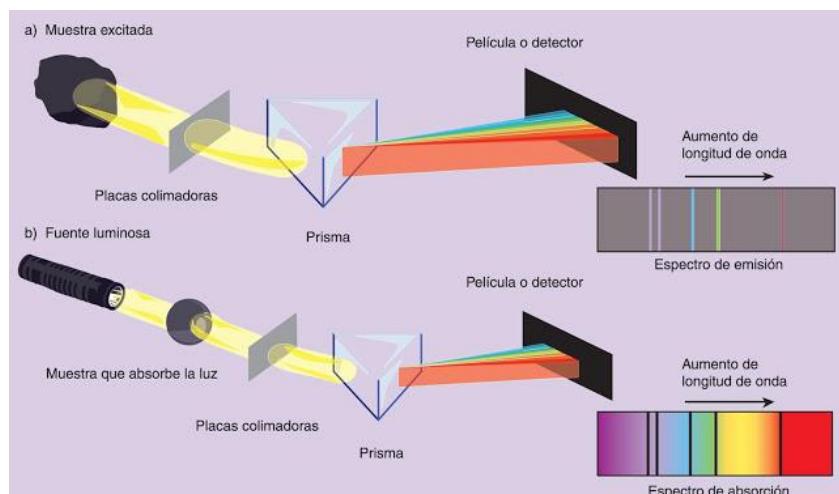
5.2. Espectroscopía.

Se trata de un conjunto de técnicas que permiten la separación y el estudio de las radiaciones monocromáticas que componen un haz de ondas electromagnéticas.

Esta basada en que cada elemento químico tiene un espectro característico, único para cada elemento. Entre las aplicaciones más utilizadas se encuentra el análisis de la radiación que llega del espacio para determinar la composición de una estrella.

Los espectros pueden ser de absorción o de emisión. En el primer caso la radiación que se quiere estudiar se absorbe y la radiación saliente se descompone en un prisma donde se estudian las ausencias del color. Los espectros de absorción sirven para estudiar la composición de las estrellas mediante el análisis de la radiación que emiten.

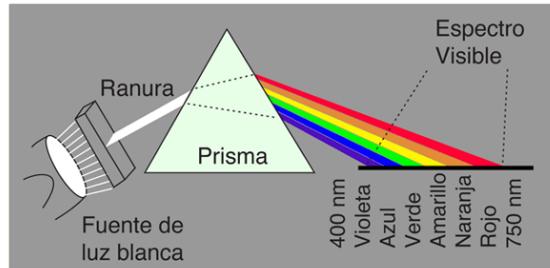
En los espectros de emisión, la muestra que se quiere estudiar se excita y la energía que se le había comunicado es devuelta en forma de radiación electromagnética de frecuencias características para cada elemento.



Especetros de emisión y absorción de un elemento. Fuente: <https://vecinadelpicasso.files.wordpress.com>

5.3. Dispersión de la luz

Cuando un haz de luz blanca atraviesa un prisma óptico, las distintas radiaciones monocromáticas son desviadas por refracción, más cuanto menor es su longitud de onda. Así, los rayos rojos son menos desviados que los azules y el haz primitivo de luz blanca se divide en los diferentes colores del espectro visible que forman un continuo según su longitud de onda.



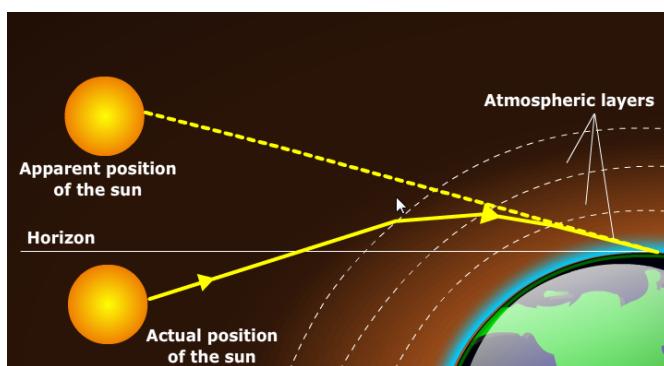
Separación de colores en un prisma. Fuente. www.hyperphysics.com.

En la siguiente [simulación](#) se pueden observar los espectros de absorción y de emisión.

5.3.1. ¿Por qué los atardeceres son rojos?

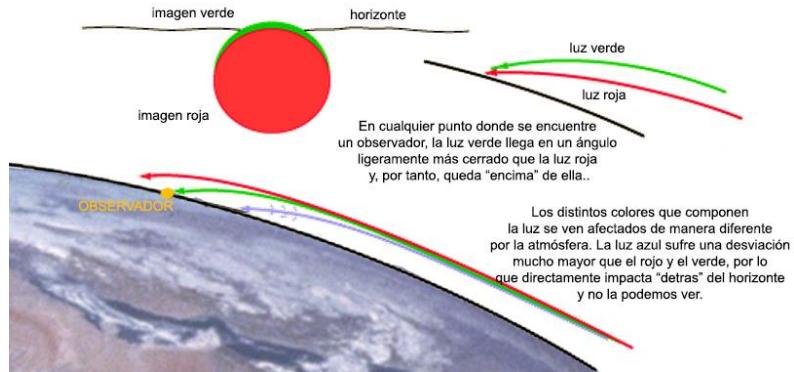
Como ya sabemos, la luz procedente del Sol es blanca, resultado de la composición de todos los colores del espectro visible que componen el arcoíris. Estas radiaciones viajan por el espacio a la misma velocidad.

Cuando estas radiaciones llegan a la atmósfera modifican su dirección debido a la refracción. Al tratarse cada color de radiaciones con diferente longitud de onda, estos colores se refractan con ángulo diferente cada uno, siendo el que más se refracta el azul y el que menos el rojo. De hecho, la posición a la que observamos el Sol no es la posición a la que realmente está, ya que los colores varían su dirección cuando llegan a la atmósfera.



Cuando atardece el Sol en realidad ya no es visible desde la línea del horizonte, pero las diferentes densidades de las capas de nuestra atmósfera curvan la luz hacia nuestros ojos. Fuente: www.ciencias.com

Conforme va atardeciendo y el Sol va desapareciendo de la línea de horizonte, los colores de menor longitud de onda (el azul) son desviados hacia el suelo mucho antes de llegar a nuestros ojos y, por tanto, no podemos verlo. La luz roja y la verde, en cambio, no se desvían tanto de su camino y son capaces de llegar hasta nosotros. Este efecto va potenciándose conforme atardece.

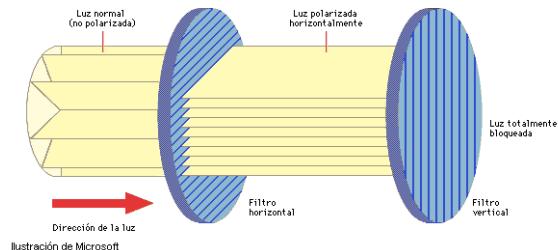


Fuente: www.cienciadesofa.com. Imagen original: hyperphysics.hpy-astr.gsu.edu

5.4. Polarización.

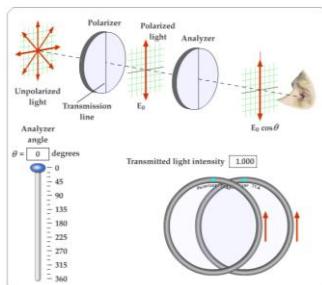
La polarización es el fenómeno ondulatorio según el cual se produce la restricción de la dirección de vibración del medio de propagación de una onda transversal.

Para entender este fenómeno hay que suponer que determinadas ondas transversales se puede producir la oscilación de las partículas del medio en infinitas direcciones perpendiculares a la propagación del a onda. Cuando dichas ondas atraviesan un determinado medio, este actúa como filtro reduciendo o directamente anulando la oscilación en aquellas direcciones que no interesan, quedando como dirección principal o única dirección de vibración aquella que permita dicho filtro.



Existen varios tipos de polarización, siendo la más sencilla aquella provocada por un plano de polarización que permanece invariable con el tiempo, denominada polarización lineal. Sin embargo, otros tipos de polarización como la circular implican la variación con el tiempo de dicho plano de polarización.

Las aplicaciones tecnológicas de la polarización están sumamente extendidas. Quizás los ejemplos más comúnmente encontrados son las pantallas de cristal líquido (LCD), las gafas de sol de cristal polarizado y los filtros polarizadores utilizados en fotografía.



En la siguiente [simulación](#) se puede observar el fenómeno de polarización de la luz por un filtro. Y en esta [página](#) se pueden leer algunas aplicaciones y videos sorprendentes sobre la polarización.

5.5. Efecto Doppler.

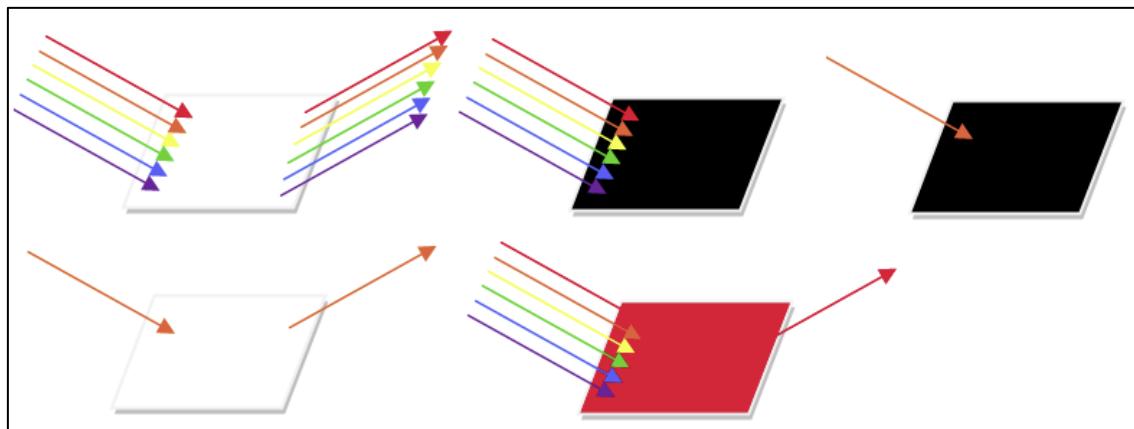
Ya se ha estudiado el efecto Doppler en el Tema 3, el cual se define como el cambio que se observa en la frecuencia de cualquier movimiento ondulatorio cuando el foco emisor y el receptor se desplazan uno respecto al otro.

Para las ondas luminosas el efecto Doppler provoca un cambio de color muy difícil de detectar, porque la velocidad de propagación de la luz es muy grande. El efecto Doppler solo es significativo cuando la velocidad es relativa observador-fuente también lo es. Si la velocidad del foco se aproxima a la velocidad de la luz hay que aplicar las ecuaciones relativistas.

La búsqueda de exoplanetas tiene su fundamento en el efecto Doppler, tal y como puede leerse en el siguiente artículo del blog de divulgación científica [naukas](#).

6. Estudio del color.

Decimos que un objeto tiene un determinado color cuando, con preferencia, refleja o transmite las radiaciones correspondientes a tal color. Un cuerpo es rojo por reflexión o por transparencia cuando absorbe en casi su totalidad, todas las radiaciones menos las rojas, las cuales refleja o se deja atravesar por ellas. Si tal cuerpo rojo, situado en la oscuridad, se ilumina con luz verde, da al ojo la sensación de ser negro.



Si tenemos tres haces luminosos monocromáticos procedentes de tres linternas de distinto color, A, B y C, a los que llamaremos *colores primarios*, al iluminar con ellos una pantalla blanca veremos los colores puros correspondientes a las radiaciones monocromáticas en las zonas únicamente iluminadas por cada uno de los haces. Pero en las zonas donde dos o tres haces se solapan aparecen nuevos colores compuestos, mezcla de los anteriores.

La luz difundida por una zona por más de un color estará constituida por una mezcla aditiva. Una mezcla aditiva de tres colores permite obtener una amplia gama de

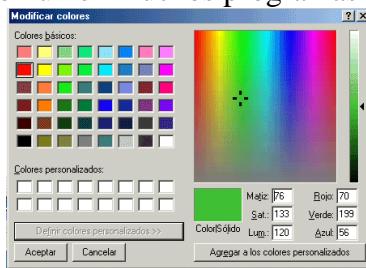
colores. En esta [simulación](#) se puede realizar una mezcla aditiva de tres colores primarios.

Cualquier color X se puede obtener en función de tres colores según la ecuación:

$$X = a \cdot A + b \cdot B + c \cdot C$$

Donde a, b y c son tres números que indican la saturación de cada uno de los colores A, B y C.

Se puede formar cualquier color mediante la combinación de tres colores primarios cualquiera. Sin embargo, si se elige el azul ($\lambda \approx 450$ nm), el verde ($\lambda \approx 550$ nm) y el rojo ($\lambda \approx 650$ nm) se puede obtener una amplia gama de colores sin utilizar cantidades negativas de alguno de los tres componentes. La paleta de colores basados en este sistema RGB es la más común en muchos programas informáticos.



Paleta de colores RGB.

Además de la mezcla aditiva se puede obtener un color dado mediante la mezcla sustractiva, que consiste interponer en el camino de un haz de luz blanca filtros de determinados colores primarios. Cada filtro deja pasar una fracción del haz luminoso que recibe, fracción que varía con cada longitud de onda.

Bibliografía

- Física 2º bachillerato. Editorial Edebé, 2016. ISBN 978-84-683-1768-7.
- Física 2º bachillerato. Editorial Anaya, 2009. ISBN: 978-84-667-8263-0.
- Física 2º bachillerato. Editorial McGraw Hill, 2009. ISBN: 978-84-481-7027-1.
- Blog de ciencia xatacaciencia.com. <http://www.xatakaciencia.com/>
- Departamento de física y química del IES Leonardo da Vinci. <http://intercentres.edu.gva.es/iesleonardodavinci/Fisica>.
- Blog Ciencia de sofá: www.cienciadesofa.com.
- PhET Interactive Simulations. Simulaciones de la Universidad de Colorado: <https://phet.colorado.edu/es/simulations/category/physics>.
- Blog el físico loco: www.elfisicoloco.blogspot.com.es
- Página web www.fisicalab.com.
- Simulaciones Walter Fendt. <http://www.walter-fendt.de>.