

2º BACHILLERATO

FÍSICA

Parte IV: ÓPTICA.

Tema 9: ÓPTICA FÍSICA.

- 9.1. Naturaleza de la luz.
- 9.2. Ecuaciones de Maxwell.
- 9.3. Ondas electromagnéticas.
- 9.4. Dispersión. Reflexión y refracción.
- 9.5. Propiedades de las ondas electromagnéticas.
- 9.6. Espectroscopía y visión del color.

9.1. Naturaleza de la luz

"La luz ha estado intrigando a la humanidad durante siglos. Las teorías más antiguas consideraban a la luz como algo que era emitido por el ojo. Posteriormente se comprendió que la luz debía proceder de los objetos que se veían y que entraba en el ojo produciendo la sensación de la visión. La cuestión de si la luz está compuesta por un haz de partículas o si es un cierto tipo de movimiento ondulatorio ha sido una de las más interesantes en la historia de la ciencia. Entre proponentes y defensores de la teoría corpuscular de la luz el más influyente fue sin duda Newton. Utilizando esta teoría pudo explicar las leyes de la reflexión y de la refracción. Sin embargo, su deducción de la ley de la refracción dependía de la hipótesis de que la luz se mueve con más rapidez en el agua o en el vidrio que en el aire, hipótesis que posteriormente se demostró que era falsa. Los principales proponentes de la teoría ondulatoria de la luz fueron Christian Huygens y Robert Hooke. Utilizando su propia teoría de la propagación de las ondas, Huygens fue capaz de explicar la reflexión y la refracción suponiendo que la luz viaja más lentamente en el vidrio o el agua que en el aire. Newton se dio cuenta de las ventajas de la teoría ondulatoria de la luz, particularmente porque explicaba los colores formados por las películas delgadas, que había estudiado a fondo. No obstante, rechazó la teoría ondulatoria debido a la aparente propagación rectilínea de la luz. En su época no se había observado aún la difracción, desviación del haz luminoso que la permite rodear obstáculos. Debido a la gran reputación y autoridad de Newton, sus seguidores se adherieron estrictamente a su rechazo de la teoría ondulatoria de la luz. Incluso después de disponer de pruebas de la difracción de la luz, los seguidores de Newton intentaron explicarla basándose en un proceso de dispersión de los corpúsculos luminosos en los bordes de las rendijas.

La teoría corpuscular de la luz de Newton fue aceptada durante más de un siglo. Luego, en 1801, Thomas Young revitalizó la teoría ondulatoria de la luz. Fue uno de los primeros en introducir la idea de interferencia como un fenómeno ondulatorio que se presentaba tanto en la luz como en el sonido. Sus observaciones de las interferencias obtenidas con la luz fueron una clara demostración de su naturaleza ondulatoria. Sin embargo, el trabajo de Young no fue conocido por la comunidad científica durante más de diez años. Quizás el mayor avance en lo que se refiere a la aceptación general de la teoría ondulatoria de la luz, se debió al físico francés Augustin Fresnel (1782-1827), que realizó extensos experimentos sobre interferencia y difracción y desarrolló la teoría ondulatoria sobre una sana base matemática. Demostró, por ejemplo, que la observada propagación rectilínea de la luz es un resultado de las longitudes de onda tan cortas de la luz visible. En 1850, Jean Foucault midió la velocidad de la luz en el agua y comprobó que es menor que en el aire, acabando así con la teoría corpuscular de la luz de Newton. En 1860, James Clerk Maxwell publicó su teoría matemática del electromagnetismo, que predecía la existencia de ondas electromagnéticas que se propagan con una velocidad calculada mediante las leyes de la electricidad y el magnetismo y que resultaba valer $3 \cdot 10^8$ m/s, el mismo valor que el de la velocidad de la luz. La teoría de Maxwell fue confirmada en 1887 por Hertz, quien utilizó un circuito eléctrico sintonizado para generar las ondas y otro circuito semejante para detectarlas. En la segunda mitad del siglo XIX, Kirchhoff y otros científicos aplicaron las leyes de Maxwell para explicar la interferencia y difracción de la luz y de otras ondas electromagnéticas y apoyar los métodos empíricos de Huygens de construcción de ondas sobre una base matemática firme.

Aunque la teoría ondulatoria es generalmente correcta cuando describe la propagación de la luz (y de otras ondas electromagnéticas), falla a la hora de explicar otras propiedades de la luz, especialmente la interacción de la luz con la materia. Hertz, en un famoso experimento de 1887 que confirmó la teoría ondulatoria de Maxwell, también descubrió el efecto fotoeléctrico, que será estudiado con detalle en el capítulo 35. Este

efecto sólo puede explicarse mediante un modelo de partículas para la luz, como Einstein demostró sólo unos pocos años después. Así se volvió a introducir un modelo corpuscular de la luz. Las partículas de luz se denominan fotones y la energía E de un fotón está relacionada con la frecuencia f de la onda luminosa asociada por la famosa relación de Einstein $E = h \cdot f$, en donde h es una constante llamada la constante de Planck. No se logró una comprensión completa de la naturaleza dual de la luz hasta la década de los 20, cuando los experimentos realizados por C. J. Davisson y L. Germer y por G. P. Thompson demostraron que los electrones (y otras "partículas") también tenían una naturaleza dual y que presentan las propiedades de interferencia y difracción además de sus bien conocidas propiedades de partículas.

El desarrollo de la teoría cuántica de los átomos y de las moléculas por Rutherford, Bohr, Schrödinger y otros científicos de este siglo condujo a un mejor entendimiento de la emisión y absorción de la luz por la materia. Ahora se sabe que la luz emitida o absorbida por los átomos es el resultado de los cambios de energía de los electrones exteriores de los átomos. Debido a que estas variaciones de energía están cuantizadas en lugar de ser continuas, los fotones emitidos tienen energías discretas que originan ondas luminosas con un conjunto discreto de frecuencias y longitudes de onda semejante al conjunto de frecuencias y longitudes de onda que se observan en las ondas sonoras estacionarias. Observada a través de un espectroscopio con una abertura en forma de rendija estrecha, la luz emitida por un átomo aparece como un conjunto discreto de líneas o rayas de diferentes colores o longitudes de onda, siendo característico de cada elemento el espaciado e intensidad de dichas líneas.

Los desarrollos tecnológicos que han tenido lugar en la segunda mitad de este siglo han conducido a un renovado interés sobre la óptica tanto teórica como aplicada. La consecución de ordenadores de alta velocidad ha permitido unas grandes mejoras en el proyecto de sistemas ópticos complejos. Las fibras ópticas están sustituyendo rápidamente a los conductores eléctricos para la transmisión de datos. El láser, inventado en 1960, ha llevado al descubrimiento de un cierto número de nuevos efectos ópticos. Hoy en día, los láseres se utilizan para leer las etiquetas en los supermercados, para realizar operaciones quirúrgicas en los hospitales, para imprimir revistas y para leer discos compactos en los sistemas de audio ordinarios. La técnica de reconstrucción de frentes de onda conocida como holografía, desarrollada a finales de los 40, se utiliza ahora en ensayos no destructivos y para el almacenamiento de datos."

Tomado del libro "Física" de Paul A. Tipler

9.2. Ecuaciones de Maxwell

Según hemos visto existe una relación entre electricidad y magnetismo.

Una carga eléctrica en movimiento crea tanto un campo eléctrico como uno magnético. Si la carga q se mueve en el vacío (constantes ϵ_0 y μ_0) con velocidad \mathbf{v} , crea dos campos dados por:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \vec{u}_r \quad \text{y} \quad \vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q \cdot \mathbf{v}}{r^2} (\vec{u}_t \times \vec{u}_r)$$

Sustituyendo la expresión de E en B , resulta:

$$\vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \vec{v} \times \vec{E}$$

Que puede expresarse como: $\vec{B} = \frac{1}{c^2} \vec{v} \times \vec{E}$, siendo $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$

La constante c coincide con la velocidad de la luz en el vacío.

Los campos eléctricos y magnéticos son dos aspectos diferentes de una misma

característica fundamental de la materia: la carga eléctrica. Por ello suele hablarse de campo electromagnético.

Todos los fenómenos electromagnéticos pueden sintetizarse en cuatro ecuaciones que fueron propuestas por Maxwell, de modo que a partir de ellas pueden deducirse todas las ecuaciones eléctricas y magnéticas.

Las Ecuaciones de Maxwell son:

1) Ley de Gauss para el campo eléctrico.

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon}$$

"Si en un campo eléctrico consideramos una superficie geométrica cerrada, el flujo eléctrico total que la atraviesa es igual a la carga eléctrica total existente en su interior dividido por la permitividad del medio."

Esta ley permite deducir la Ley de Coulomb y es la base de la electrostática.

2) Ley de Gauss para el campo magnético.

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

"Si en un campo magnético consideramos una superficie geométrica cerrada, el flujo magnético que la atraviesa es siempre igual a cero."

Como consecuencia de esta ley las líneas de campo magnético son cerradas y no existen polos magnéticos aislados.

3) Ley de Faraday-Henry.

$$\oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

"Toda variación del flujo magnético que atraviesa un circuito cerrado produce en él una corriente eléctrica inducida."

Dicho de otra forma, los campos magnéticos variables producen a su alrededor campos eléctricos.

4) Ley de Ampère-Maxwell.

$$\oint_c \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

"Los campos magnéticos son producidos por corrientes eléctricas y también por campos eléctricos variables."

9.3. Ondas electromagnéticas

Los trabajos de Maxwell en 1873, además de establecer las cuatro ecuaciones, predijeron la existencia de ondas electromagnéticas. Las ecuaciones implicaban que las variaciones de los campos eléctricos y magnéticos podían propagarse por el espacio; si, por ejemplo, en un punto tenemos un campo eléctrico variable, este campo, según la cuarta ecuación de Maxwell genera un campo magnético variable, que a su vez, de acuerdo con la tercera ecuación de Maxwell genera otro campo eléctrico variable y así sucesivamente. El campo eléctrico y el campo magnético se propagan por el espacio. Las ondas electromagnéticas están compuestas por dos campos, uno eléctrico y otro magnético, mutuamente perpendiculares y perpendiculares a la dirección de propagación que se desplazan con una velocidad c en el vacío.

$$\vec{E} = E_0 \cdot \text{sen } k(x-ct)$$

$$\vec{B} = B_0 \cdot \text{sen } k(x-ct)$$

Existe una relación entre los valores de los módulos de los campos eléctrico y magnético:

$$B = E/c$$

La velocidad de estas ondas corresponde a la expresión:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

Sustituyendo los valores se obtiene el valor de c en el vacío:

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

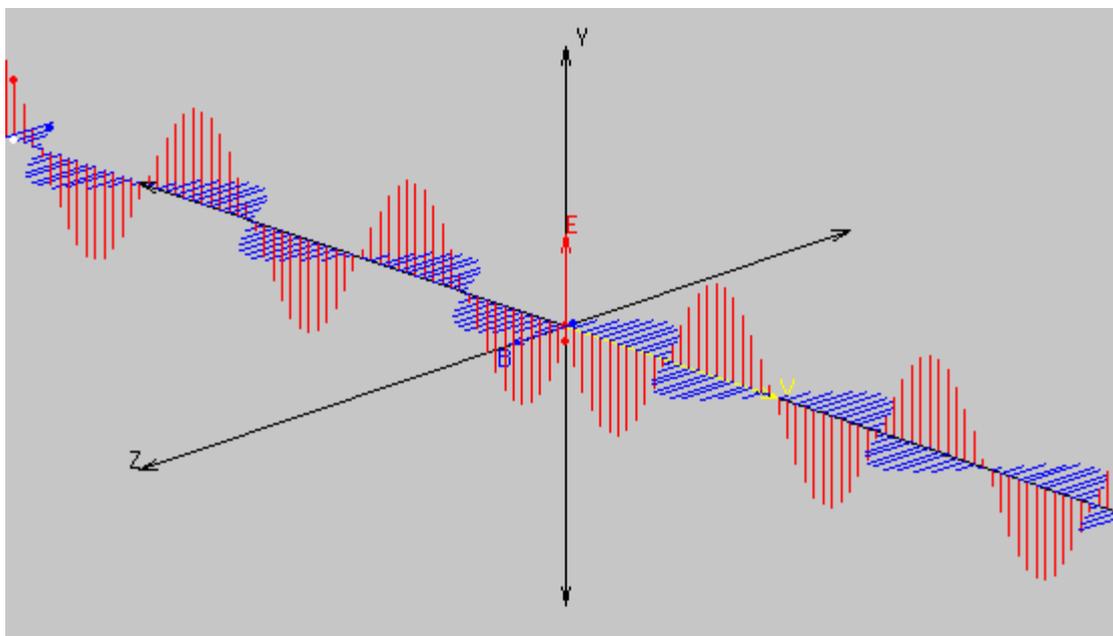
Este valor coincide con la velocidad de la luz en el vacío. Ello hizo pensar que la luz es una de estas ondas electromagnéticas. Debido a ello la óptica pasó a ser un capítulo más de la teoría electromagnética.

Estas ondas electromagnéticas se producen siempre que hay cargas eléctricas aceleradas. En 1887 Hertz probó experimentalmente la existencia de las ondas electromagnéticas y determinó su velocidad de propagación en el vacío, que coincidía con el valor esperado.

Todas las ondas electromagnéticas se propagan a la velocidad de la luz, pero difieren unas de otras en su frecuencia y por tanto en su longitud de onda.

Las ondas electromagnéticas suelen clasificarse en función de su frecuencia aunque no hay unos límites precisos para cada grupo. El conjunto de los distintos tipos de ondas electromagnéticas se llama **espectro electromagnético**. Está constituido por:

- **Radioondas:** 1 - 10^9 Hz
- **Microondas:** 10^9 - 10^{11} Hz
- **Infrarrojos:** 10^{11} - $4 \cdot 10^{14}$ Hz
- **Visible:** $4 \cdot 10^{14}$ - $8 \cdot 10^{14}$ Hz
- **Ultravioleta:** $8 \cdot 10^{14}$ - 10^{17} Hz
- **Rayos X:** 10^{17} - 10^{19} Hz
- **Rayos γ :** 10^{19} - 10^{22} Hz



9.4. Dispersión. Reflexión y refracción.

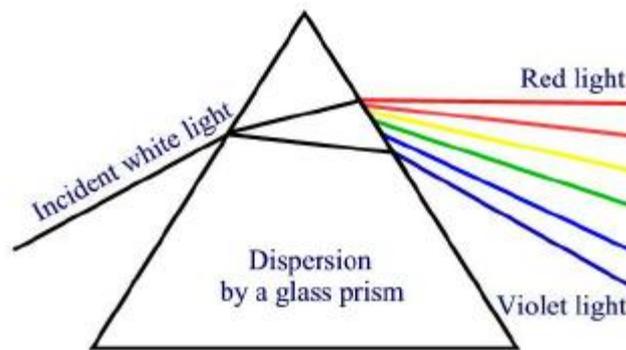
En un cuerpo opaco, una parte de la luz es reflejada en todas las direcciones y otra parte es absorbida. En los cuerpos transparentes, una parte de la luz se refleja en todas las direcciones, otra parte es absorbida por el cuerpo y otra se propaga en su interior. Los cuerpos coloreados presentan la propiedad de absorber preferentemente luz de una determinada longitud de onda y reflejar la demás.

La velocidad de la luz, y de las demás ondas electromagnéticas, en el vacío es una constante universal que no depende del sistema de referencia elegido y cuyo valor es $c = 299.792.457 \text{ m/s}$ (como valor aproximado se puede tomar $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$). La velocidad de la luz en otro medio se caracteriza mediante el índice de refracción, que se define como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío entre la velocidad de la luz en ese medio:

$$n = c/v$$

Se considera que la luz está compuesta por cuantos de energía o fotones que cumplen la relación de Planck: $E = h \cdot f$, siendo h la constante de Planck de valor $6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$.

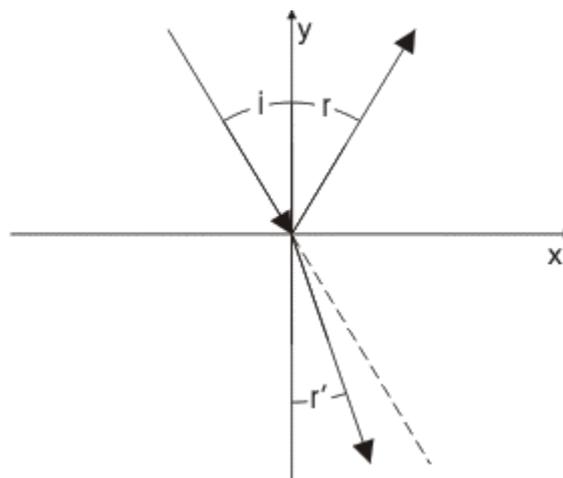
Otra propiedad que se conoce desde antiguo es la dispersión o fenómeno por el cual la luz al atravesar un prisma se descompone en luces de todos los colores. En el prisma se producen dos refracciones, una a la entrada y otra a la salida. Cuando la luz entra en el vidrio, la de longitud de onda corta disminuye su velocidad más, y se desvía más, que la de longitud de onda larga. Ello pone de manifiesto que la luz natural está compuesta por luces con distintos valores de la longitud de onda. Un caso curioso y conocido es el arco iris que se debe a la dispersión de la luz solar por refracción en las gotas de agua.



Al conjunto de colores que componen la luz visible se le llama espectro visible, y se compone de los siguientes colores:

- Rojo: de 7500 a 6200 Å,
- Naranja: de 6200 a 5900 Å,
- Amarillo: de 5900 a 5700 Å,
- Verde: de 5700 a 4900 Å,
- Azul: de 4900 a 4600 Å,
- Añil: de 4600 a 4300 Å y
- Violeta: de 4300 a 4000 Å.

La reflexión se produce en la luz igual que en las demás ondas, cumpliéndose la ley de que los ángulos de incidencia y reflexión son iguales. Puede distinguirse entre la reflexión difusa que se produce en las superficies rugosas y que es la que nos permite ver la inmensa mayoría de los objetos y la reflexión especular que se produce en los espejos y otras superficies pulimentadas.



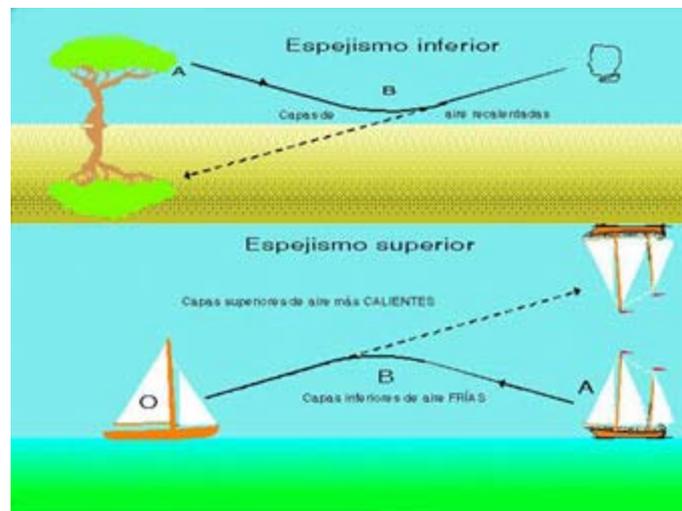
La refracción se produce cuando la luz atraviesa la superficie de separación de dos medios cambiando su velocidad. Viene regida por las leyes de coplanaridad de los rayos y de Snell:

$$n_1 \text{ sen } i = n_2 \text{ sen } r$$

Cuando la luz pasa de un medio con mayor índice de refracción a otro con menor índice de refracción se aleja de la normal. Al ir aumentando el ángulo de incidencia llega un momento en que el ángulo de refracción es de 90° . A este valor del ángulo de incidencia se le llama ángulo límite. Para ángulos de incidencia mayores que el ángulo límite no existe rayo refractado; toda la luz se refleja. Este fenómeno es conocido como reflexión total.

La reflexión total se utiliza en prismas para cambiar la dirección de los rayos de luz y es la base del funcionamiento de las fibras ópticas que actualmente están alcanzando un gran desarrollo.

Cuando el índice de refracción de un medio varía gradualmente, la refracción es continua, de forma que la luz se va curvando paulatinamente. Un ejemplo interesante de esto es la variación del índice de refracción del aire debido a variaciones de temperatura que da lugar a los espejismos.



Cuando la luz atraviesa una lámina de caras planas y paralelas se producen dos refracciones, una a la entrada y otra a la salida, de tal forma que el rayo emergente es paralelo al rayo incidente. Únicamente se produce una pequeña desviación lateral que no afecta a la forma de las imágenes.

9.5. Propiedades de las ondas electromagnéticas

Interferencias

Thomas Young fue el primero en estudiar las interferencias luminosas.

Como ya hemos visto cuando dos ondas se encuentran producen en cada punto una perturbación que es la suma de las perturbaciones que produciría cada una por separado. Además una vez traspasado el lugar de la superposición, los movimientos ondulatorios vuelven a conservar su forma original.

En determinadas condiciones pueden obtenerse zonas de franjas claras y oscuras. Para ello se debe cumplir que:

- Las ondas deben ser coherentes, es decir, la diferencia de fase entre ambas ondas debe ser constante.

b) Las ondas deben ser de igual frecuencia y amplitud, y las amplitudes de direcciones paralelas.

Se cumplen las condiciones de interferencia constructiva (luz) y destructiva (oscuridad):

$$x_1 - x_2 = n \lambda; \quad \delta = 2 n \pi$$
$$x_1 - x_2 = (2n + 1) \lambda/2; \quad \delta = (2n + 1) \pi$$

Si las ondas que interfieren tienen diferente frecuencia la onda resultante varía con el tiempo y no hay un patrón de interferencia estable.

Si tienen distinta amplitud no se obtiene un buen contraste pues no se anula la amplitud en los puntos que hay oposición de fase.

Si las ondas son incoherentes la intensidad resultante en todos los puntos es igual a la suma de las intensidades en todos los puntos y no se obtiene patrón de interferencia.

El fenómeno de las interferencias luminosas no significa aniquilación de la energía luminosa, sino su redistribución.

La forma más sencilla de producir interferencias es mediante la experiencia de Young, que consiste en dejar pasar la luz de una fuente luminosa a través de dos rendijas estrechas y cercanas.

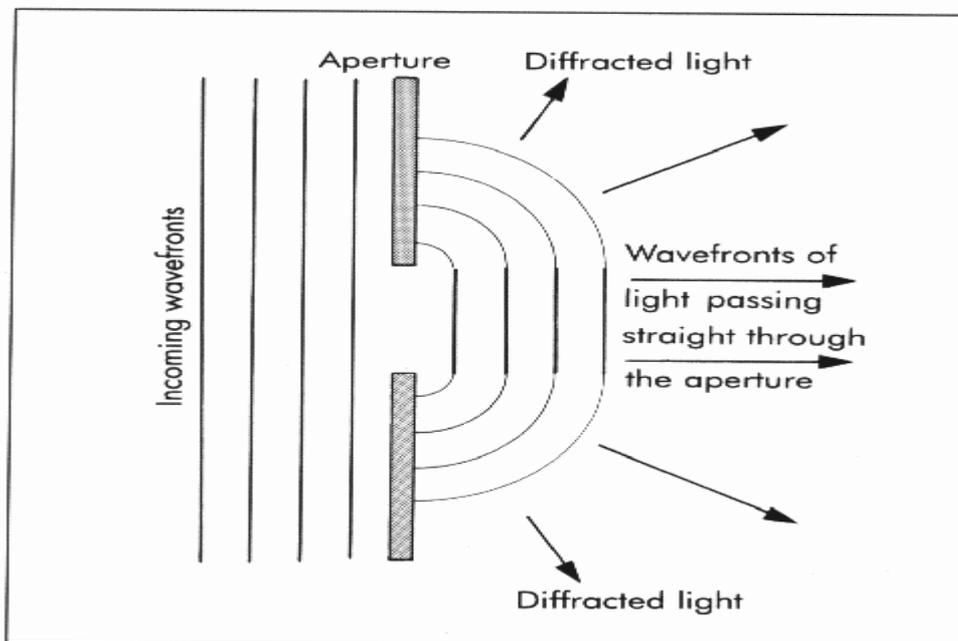
Difracción

Consiste en la aparición de zonas claras y oscuras cuando la luz atraviesa una abertura pequeña o bordea un obstáculo pequeño.

Puede observarse al ver las estrellas, en los halos de la Luna y otras luces, etc.

La difracción se explica como un fenómeno de interferencia entre las ondas que atraviesan la abertura y las ondas secundarias emitidas por el borde de la rendija.

El obstáculo difractor debe tener un tamaño comparable a la longitud de onda de la luz empleada.



En la práctica, se procura que tanto la pantalla como el foco emisor estén muy lejos del obstáculo difractor, con lo cual pueden considerarse frentes de ondas planos. Esto se llama difracción de Fraunhofer y se consigue utilizando dos lentes convergentes.

Polarización

El descubrimiento de la luz polarizada está asociado al de la doble refracción o birrefringencia, que consiste en que los objetos se ven dobles a través de algunas

sustancias como una variedad de calcita llamada espato de Islandia. Al girar el cristal se observa que una de las imágenes permanece fija (rayo ordinario) mientras la otra gira (rayo extraordinario).

La explicación de este fenómeno es la siguiente: la luz ordinaria consiste en ondas oscilando igualmente en todos los planos posibles perpendiculares a la dirección de propagación. En el cristal la luz se refracta en dos ángulos distintos y produce dos rayos, de forma que uno consiste en ondas oscilando en un plano dado, mientras que el otro son ondas que oscilan en un plano perpendicular al primero.

En estos casos se dice que la luz está linealmente polarizada.

Si el vector campo eléctrico (y por tanto el vector campo magnético) describe circunferencias o elipses se habla de luz polarizada circular o elíptica.

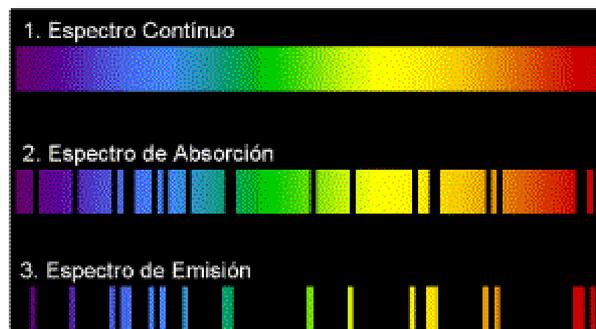
Efecto Doppler

Debido a la gran velocidad de la luz este efecto sólo es apreciable cuando la velocidad del foco y/o el observador son muy grandes.

Sin embargo, gracias a esta propiedad se ha comprobado la expansión del Universo al detectarse un corrimiento hacia el rojo de las líneas espectrales de la mayoría de las galaxias.

9.6. Espectroscopía y visión del color

Los espectroscopios son aparatos que se utilizan para dispersar la luz emitida o transmitida por un cuerpo, de forma que se puedan ver sus diferentes componentes monocromáticas. La imagen obtenida se llama espectro de la luz utilizada.



Para producir la dispersión de la luz se utilizan prismas o redes de difracción (consisten en un gran número de rayas o rendijas igualmente separadas grabadas en una superficie plana).

Espectros de emisión

En general, la luz emitida por un objeto no está compuesta como la luz blanca, sino tan sólo por algunas componentes. Al colocar un elemento químico incandescente en un espectroscopio aparecen unas franjas estrechas de luz de distintas frecuencias. El espectro de emisión es característico de cada elemento y se utiliza para distinguirlo de los demás.

Los espectros de emisión se producen cuando los electrones previamente excitados vuelven a su estado fundamental emitiendo energía de determinadas frecuencias ($\Delta E = h \cdot f$).

Espectros de absorción

Cuando la luz blanca atraviesa un objeto, éste absorbe la luz de unas determinadas frecuencias (que coinciden con las emitidas en los espectros de emisión). El espectro que se

obtiene es un espectro continuo con algunas rayas negras correspondientes a las frecuencias absorbidas.

El mecanismo es el contrario al de los espectros de emisión: los electrones absorben los fotones de unas determinadas frecuencias y pasan a niveles superiores de energía.

El color de los cuerpos

La luz blanca que procede del Sol puede considerarse como una mezcla de "luces" de diferentes frecuencias o colores (radiaciones monocromáticas).

Cuando una radiación luminosa incide sobre un cuerpo, parte de la luz se refleja (especular o difusamente), otra parte se transmite y otra parte es absorbida por el cuerpo.

El color que presenta un cuerpo depende de:

- La naturaleza de su superficie.
- El tipo de luz que lo ilumina.

Color de los cuerpos opacos.

No transmiten la luz. Pueden suceder tres casos:

1. El cuerpo refleja todas las radiaciones. Se ve del color de la luz que lo ilumine. Con luz natural se ve blanco.
2. Refleja algunas radiaciones y absorbe las demás. El cuerpo es coloreado. Se ve de su color al iluminarlo con luz que contenga ese color, en caso contrario se ve negro.
3. Absorbe todas las radiaciones. El cuerpo se ve siempre negro.

Color de los cuerpos transparentes.

Ofrecen el color de la luz que dejan pasar a su través.