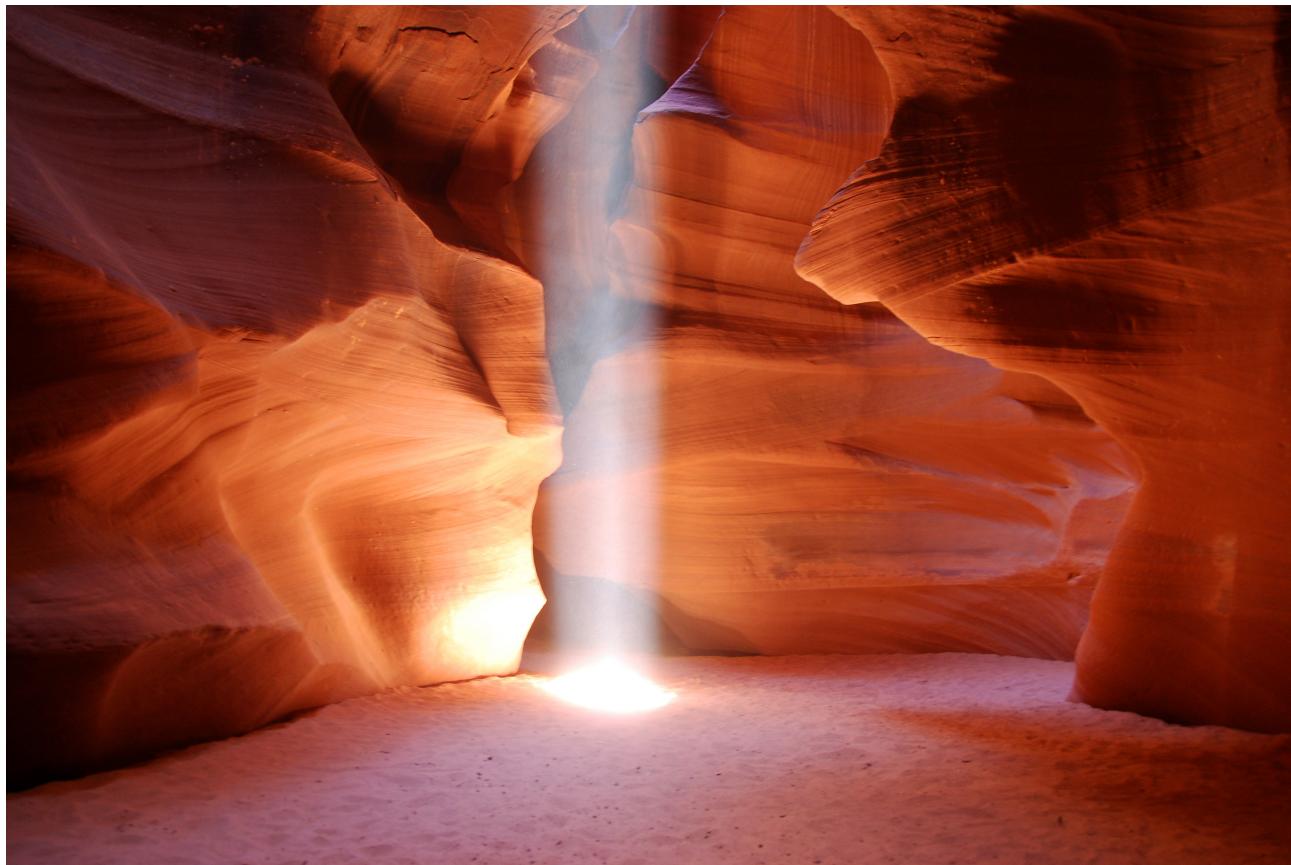


Tema 06: Ondas electromagnéticas.



0601. 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 adhirieron 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 espacio 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

0602. Características de las 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.

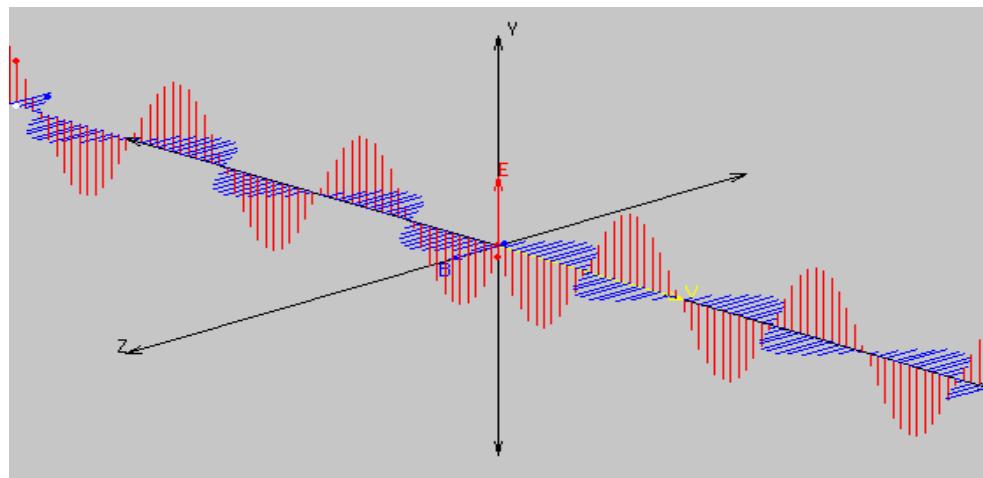
Principales características de las ondas electromagnéticas:

- ✓ Son originadas por cargas aceleradas.
- ✓ Consisten en variaciones periódicas del estado electromagnético del espacio.
- ✓ No necesitan soporte material para propagarse.
- ✓ Tanto el campo eléctrico como el campo magnético varían de forma sinusoidal, y por tanto les son aplicables las ecuaciones de las ondas armónicas:

$$\mathbf{E} = E_0 \cdot \operatorname{sen} k(x-ct) \quad \mathbf{B} = B_0 \cdot \operatorname{sen} k(x-ct)$$

- ✓ Los módulos de los campos eléctrico y magnético para una posición y un tiempo dados están relacionados por la fórmula: $\mathbf{B} = \mathbf{E}/c$
- ✓ La velocidad de estas ondas depende del medio por el que se propaguen; en el caso del vacío o el aire:

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



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.

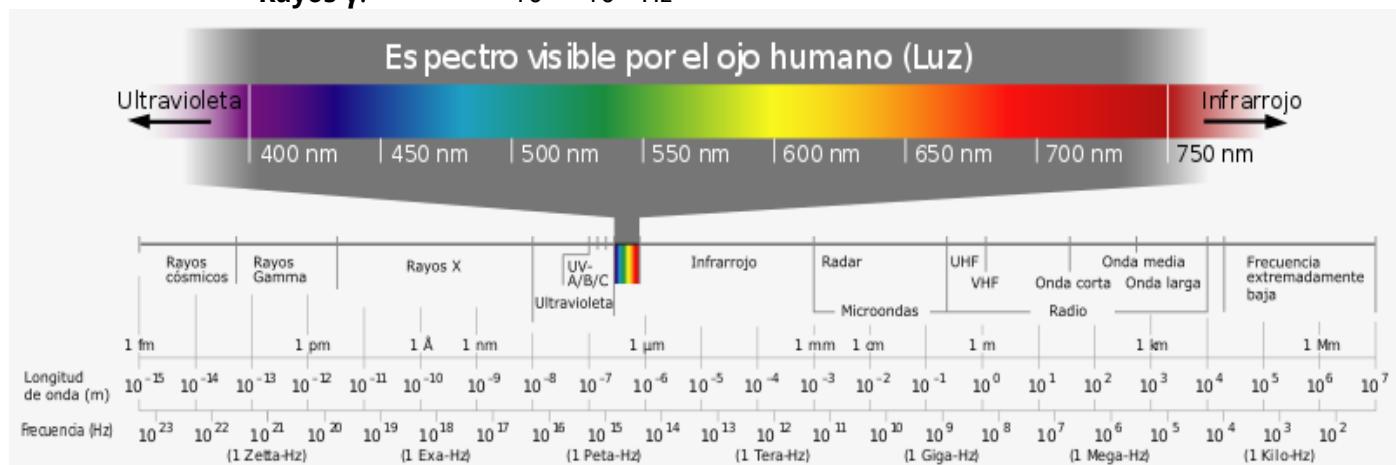
- ✓ Se cumple en ellas la relación de las ondas: $v = \lambda \cdot f$

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**. Puede considerarse constituido por siete tipos más importantes de radiaciones:

- **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 y:** $10^{19} - 10^{22}$ Hz



0603. Propagación de la luz: reflexión, refracción y dispersión.

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 $c = 299.792.457$

m/s (como valor aproximado se puede tomar $3 \cdot 10^8$ 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:

$$n = c/v$$

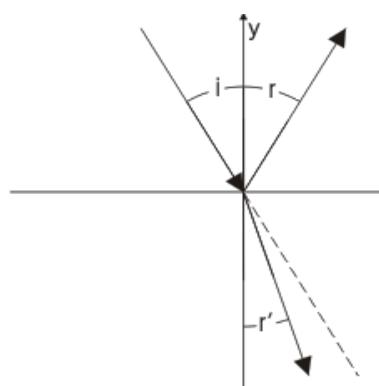
Este índice de refracción no tiene unidades y siempre es mayor que 1.

Esta variación de la velocidad de la luz al propagarse por otros medios distintos al vacío se corresponde con la variación de su longitud de onda, ya que la frecuencia de la onda permanece constante.

$$n = c / v = (\lambda_0 \cdot f) / (\lambda \cdot f) = \lambda_0 / \lambda$$

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 $6,63 \cdot 10^{-34}$ J·s.

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.

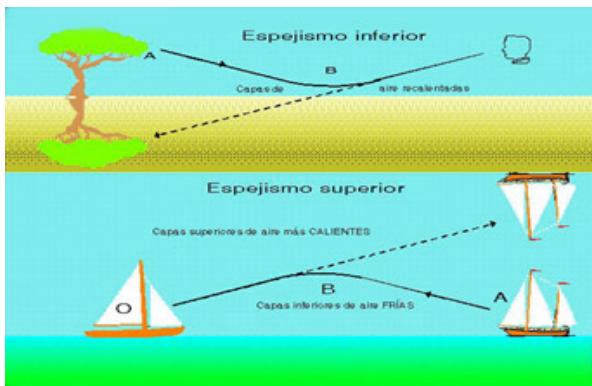


La reflexión se produce en la luz igual que en las demás ondas, cumpliéndose la ley de que los ángulos de incidencia y reflexión son iguales. Puede distinguirse entre la reflexión difusa que se produce en las superficies rugosas y que es la que nos permite ver la inmensa mayoría de los objetos y la reflexión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

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

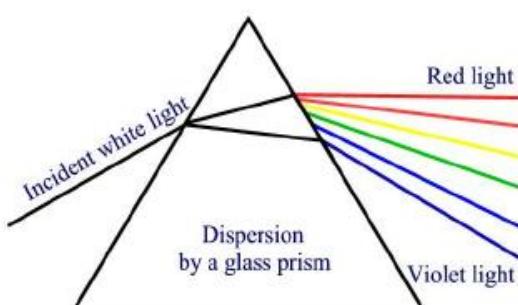
Cuando la luz pasa de un medio con mayor índice de refracción a otro con menor índice de refracción se aleja de la normal. Al ir aumentando el ángulo de incidencia llega un momento en que el ángulo de refracción es de 90° . A este valor del ángulo de incidencia se le llama ángulo límite. Para ángulos 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.

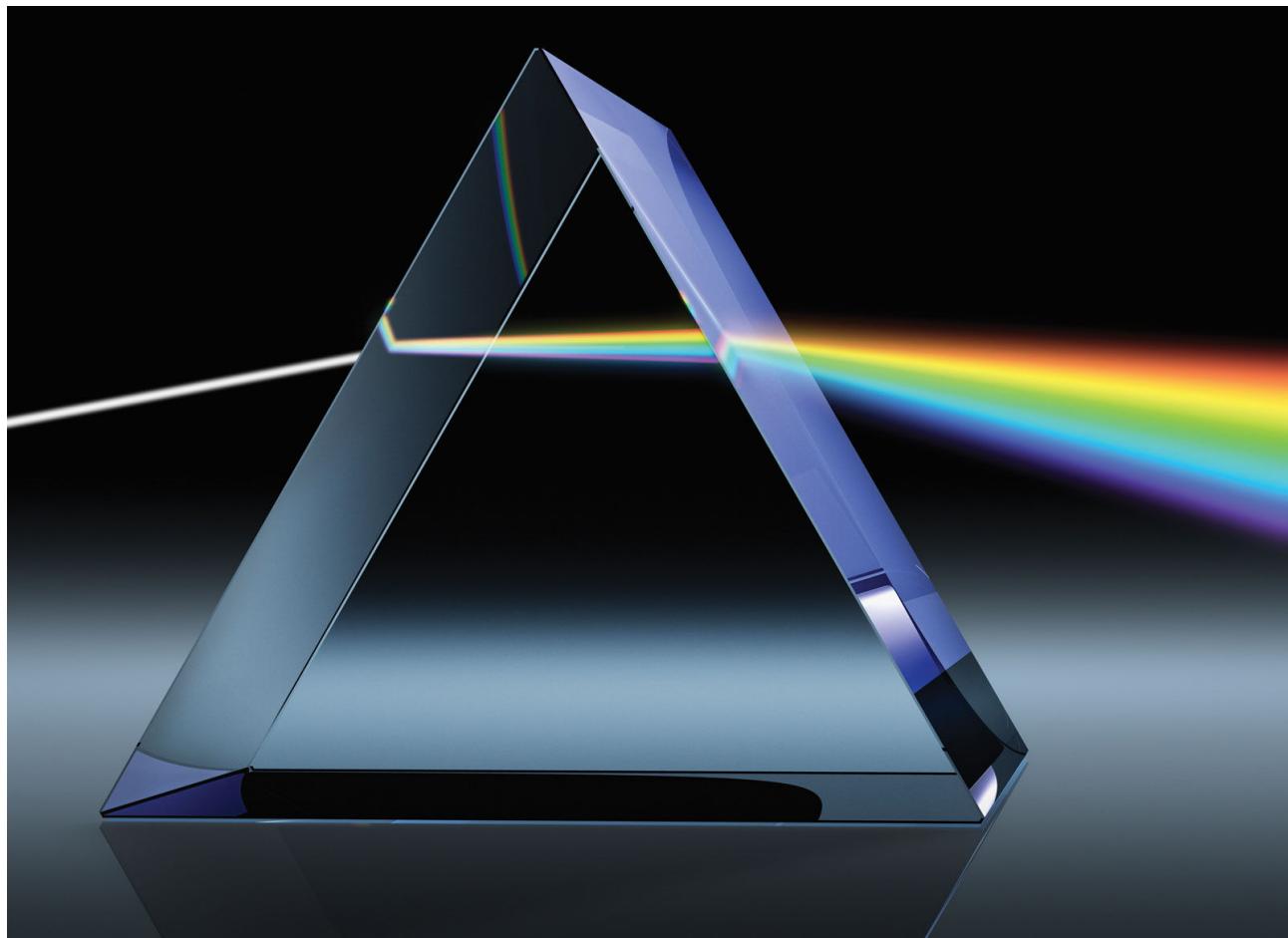
Cuando el índice de refracción de un medio varía gradualmente, la refracción es continua, de forma que la luz se va curvando paulatinamente. Un ejemplo interesante de esto es la variación del índice de refracción del aire debido a variaciones de temperatura que da lugar a los espejismos.

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.



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.



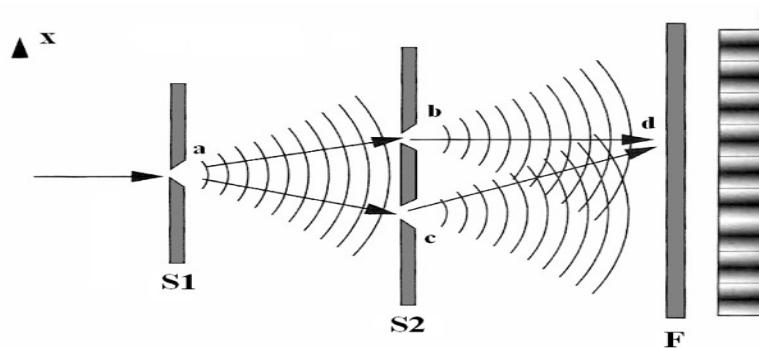
Al conjunto de colores que componen la luz visible se le llama espectro visible, y se compone de los siguientes colores:

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.

0604. Fenómenos ondulatorios de la luz: interferencias, difracción y polarización. 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.
- 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):

$$x_1 - x_2 = n \lambda;$$

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

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.

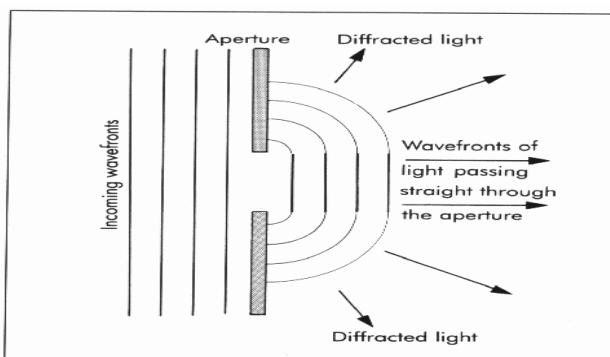
El fenómeno de las interferencias luminosas no significa aniquilación de la energía luminosa, sino su redistribución.

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

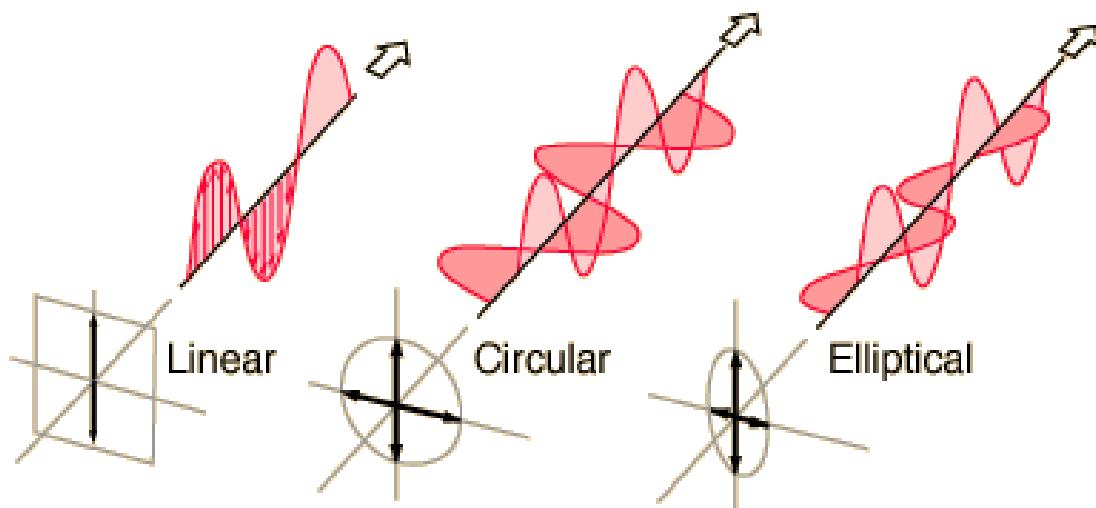
Consiste en la vibración del campo eléctrico (y por tanto el magnético) en una dirección preferente sobre las demás.



- Es una característica de las ondas transversales que las distingue de las longitudinales.
- Tipos de polarización:
 - Lineal: el vector E se mantiene en un plano.
 - Circular: el vector E describe una circunferencia.
 - Elíptica: El vector E describe una elipse.
- Métodos para producir luz polarizada:
 - ➔ Polarización por reflexión: al reflejarse la luz se aprecia que la luz reflejada vibra preferentemente en un plano perpendicular al plano de incidencia. La polarización es total para un ángulo tal que el rayo refractado y el reflejado formen 90° . Dicho ángulo se conoce como ángulo de Brewster.
 - ➔ Polarización por absorción selectiva: determinadas sustancias llamadas polaroides absorben la luz que vibra en todas las direcciones excepto una y por tanto producen luz polarizada.

Clasificación de la Polarización

La luz en la forma de una onda plana en el espacio, se dice que está linealmente polarizada. La luz es una onda electromagnética transversal, pero la luz natural por lo general no está polarizada, todos los planos de propagación son igualmente probables. Si la luz está compuesta de dos ondas planas de igual amplitud pero con una diferencia de fase de 90° , entonces se dice que la luz está polarizada circularmente. Si las dos ondas planas tienen diferente amplitud y están desfasadas entre sí 90° , o si el desfase es distinto de 90° , la luz se dice que está polarizada elípticamente.



Tomado de hyperphysics

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.

0605. Introducción a la óptica geométrica

La longitud de onda de la luz suele ser muy pequeña en comparación con el tamaño de obstáculos ó aberturas que se encuentra a su paso. Esto permite en general despreciar los efectos de interferencia y difracción asociados al carácter ondulatorio de la luz. Sobre esta hipótesis se asume una propagación rectilínea de los rayos de luz dando lugar a la disciplina conocida como óptica geométrica. Los axiomas sobre los que se construye la óptica geométrica son:

1. Las trayectorias de los rayos de luz en los medios homogéneos e isótropos son rectilíneas.
2. El rayo incidente, el refractado y la normal están en un mismo plano.
3. Se cumple la ley de la reflexión.
4. Se cumple la ley de la refracción.
5. Las trayectorias de la luz a través de distintos medios son reversibles.
6. No existe interacción entre los diferentes rayos.

donde los cinco primeros axiomas se deducen del principio de Fermat, tal y como vimos en el capítulo anterior, y el último supone ignorar el carácter ondulatorio de la luz.

La óptica geométrica se ocupa principalmente de la formación de imágenes por espejos y lentes, base de la construcción de instrumentos ópticos tales como microscopios ó telescopios.

SISTEMAS ÓPTICOS

Al conjunto de medios materiales limitados por superficies donde la luz se refleja o se refracta le llamamos sistema óptico.

En la óptica geométrica no se tienen en cuenta las propiedades ondulatorias ni corpusculares de la luz, se supone que la luz no se difracta y se utiliza el modelo de rayo de luz, que es una línea de avance perpendicular al frente de onda. Los rayos de luz son reversibles en su propagación e independientes unos de otros.

Cuando los rayos de luz procedentes de un punto se juntan en otro punto decimos que el sistema óptico es estigmático; en caso contrario se dice que es astigmático. Decimos que un sistema óptico es centrado cuando todas las superficies de separación de medios tienen un eje común de simetría, que pasa a llamarse eje óptico.

Los sistemas ópticos centrados pueden considerarse estigmáticos cuando los rayos de luz son muy cercanos al eje óptico, y por tanto forman con él ángulos muy pequeños.

Cuando los rayos de luz que parten de un punto se concentran en otro distinto se dice que el segundo punto es la imagen del primero.

Clasificación de las imágenes formadas por un sistema estigmático:

A) Según su naturaleza.

- ✓ Imágenes reales: los rayos procedentes de un objeto se juntan en un punto. La imagen debe proyectarse sobre una pantalla para ser visible.
- ✓ Imágenes virtuales: los rayos procedentes de un mismo objeto divergen y es su prolongación la que se junta en un punto. No pueden proyectarse en un plano pero son visibles para un observador.

B) Según su orientación:

- Imágenes derechas: están en la misma orientación que el objeto.
- Imágenes invertidas: están orientadas al revés que el objeto.

C) Según su tamaño:

- Imágenes mayores.
- Imágenes iguales
- Imágenes menores.

CONVENIO DE SIGNOS

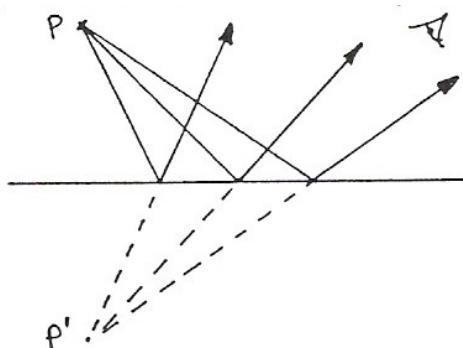
- Las magnitudes que hacen referencia a la imagen se representan por las mismas letras que las que hacen referencia al objeto, añadiéndoles el signo "prima".
- La luz siempre se propaga de izquierda a derecha.

- El centro del sistema óptico se sitúa en el origen de coordenadas de un sistema cartesiano. Las distancias horizontales son positivas hacia la derecha y las verticales hacia arriba.

0606. Sistemas ópticos: espejos.

Espejos planos

En los **espejos planos** la imagen de un punto P es otro punto P' del que parecen provenir los rayos de luz después de reflejarse en el espejo. La imagen se dice que es virtual porque la luz no procede realmente de la imagen (las imágenes virtuales se ven pero no pueden recogerse en una pantalla; las imágenes reales no se ven y pueden recogerse en una pantalla). En los espejos planos se produce una inversión de profundidad que da lugar a una inversión derecha-izquierda.



Para estudiar matemáticamente las imágenes formadas en los espejos se definen las siguientes magnitudes:

Distancia objeto (s): distancia desde el objeto hasta el espejo.

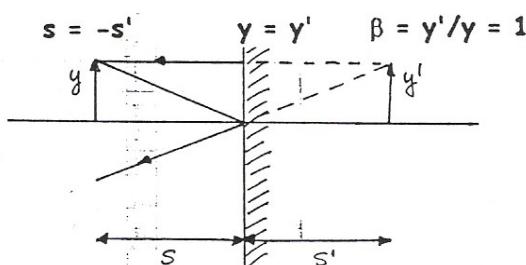
Distancia imagen (s'): distancia desde la imagen hasta el espejo.

Tamaño objeto (y): tamaño del objeto.

Tamaño imagen (y'): tamaño de la imagen.

Aumento lateral (β): Relación entre el tamaño del objeto y el de la imagen.

Para espejos planos se cumple:



Espejos esféricos

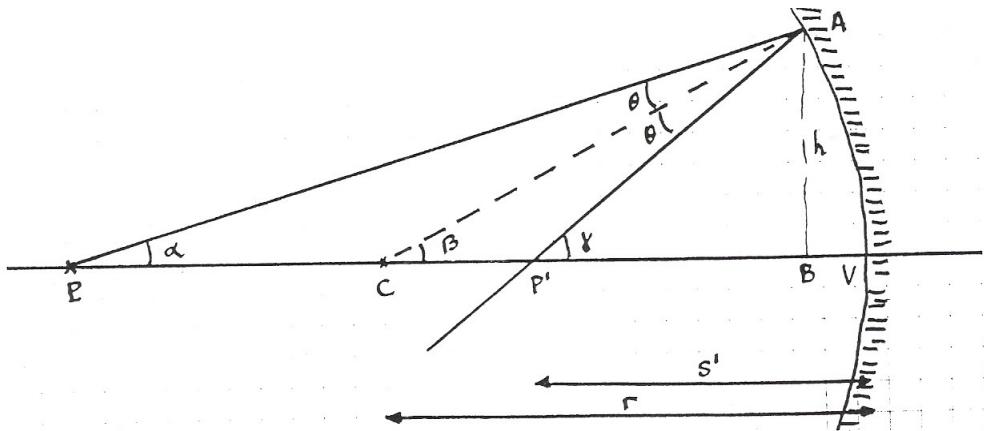
Los **espejos esféricos** son superficies esféricas convertidas en espejos. Pueden ser de dos tipos: **cóncavos o convexos**, según sea su curvatura. Para su estudio deben considerarse los siguientes elementos:

1. **Centro de curvatura (c):** es el centro de la superficie esférica.

2. **Vértice (V):** es el polo del casquete esférico.

3. **Eje principal:** Es la línea recta que pasa por V y por c.

El criterio de signos es el mismo que en los espejos planos: todas las distancias que están a la derecha del espejo y hacia arriba del eje principal se consideran positivas.



De la figura se deduce que:

$$\beta = \alpha + \theta \text{ (triángulo PAC)}$$

$$\gamma = \alpha + 2\theta \text{ (triángulo PAP')}$$

$$\text{Eliminando } \theta \text{ entre las dos ecuaciones: } \theta = \beta - \alpha; \gamma = \alpha + 2\beta - 2\alpha; 2\beta = \alpha + \gamma.$$

Suponiendo que los ángulos son muy pequeños, cada ángulo puede considerarse igual a la tangente de ese ángulo. Este caso se da cuando los rayos son muy cercanos al eje y se les denomina **rayos paraxiales**. Cuando los rayos no son paraxiales no puede aplicarse la ecuación que vamos a deducir.

$$\alpha \approx \tan \alpha = AB/PB \approx h/s$$

$$\beta \approx \tan \beta = AB/CB \approx h/r$$

$$\gamma \approx \tan \gamma = AB/P'B \approx h/s'$$

De donde se obtiene:

$$\frac{2}{r} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$$

Esta es la **fórmula de Descartes** para la reflexión en un espejo esférico.

Cuando el rayo incidente es paralelo al eje principal $s = \infty \Rightarrow s' = r/2$.

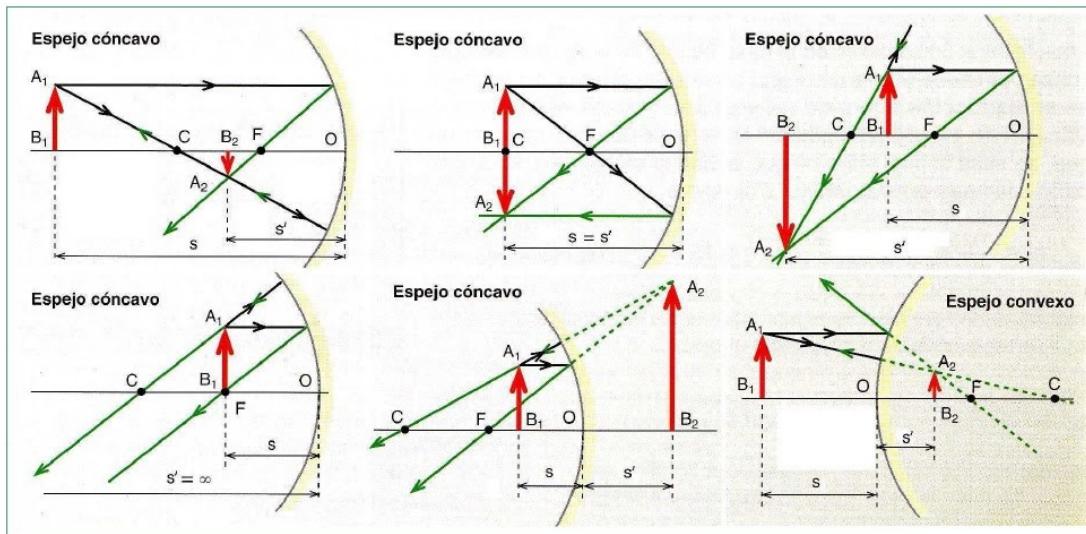
El punto que cumple esta condición se llama **foco (F)** y la distancia al espejo **distanzia focal (f)**. Otra forma de escribir la ecuación de Descartes en función de la distancia focal es:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

Inversamente todos los rayos que pasan por el foco se reflejan paralelamente al eje principal.

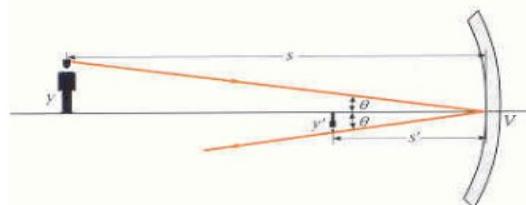
Para construir las imágenes en los espejos esféricos se utilizan dos de estos tres rayos:

- Un rayo incidente paralelo al eje se refleja pasando por el foco.
- Un rayo incidente que pase por el foco se refleja paralelo al eje.
- Un rayo que pase por el centro no se desvía al reflejarse.



Clase de espejo	Situación del objeto	Características de la imagen
Cóncavo	$s > 2f$	Real, menor e invertida
Cóncavo	$s = 2f$	Real, igual e invertida
Cóncavo	$f < s < 2f$	Real, mayor e invertida
Cóncavo	$s = f$	No se forma imagen
Cóncavo	$s < f$	Virtual, mayor y derecha
Convexo	En cualquier punto	Virtual, menor y derecha

Para calcular el aumento lateral en un espejo esférico, observemos la figura:

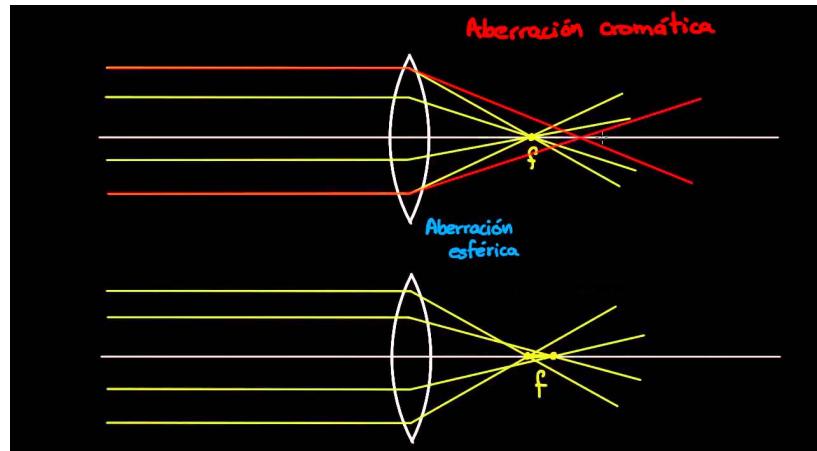


$$\tan \theta = y/VA = y'/VB \Rightarrow y/s = -y'/s' \Rightarrow \beta = y'/y = -s'/s$$

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}$$

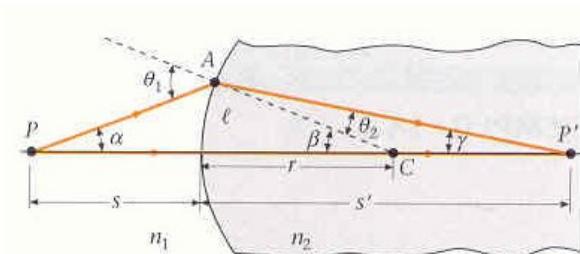
Cuando los rayos no son paraxiales, no todos los rayos procedentes de un mismo punto se reflejan pasando por el mismo punto; ello da lugar a imágenes borrosas y el fenómeno se llama **aberración esférica**.



0607. Sistemas ópticos: dioptrios.

Recibe el nombre de dioptrio un conjunto formado por dos medios transparentes, isótropos y homogéneos, separados por una superficie. según sea esa superficie, los dioptrios se clasifican en planos y esféricos.

De la figura podemos deducir la ecuación general del dioptrio esférico:



$$\frac{n_2}{s'} - \frac{n_1}{s} = \frac{(n_2 - n_1)}{r}$$

Los dioptrios planos pueden considerarse un caso particular de dioptrios esféricos con $r = \infty$.

$$\frac{n_2}{s'} - \frac{n_1}{s} = 0$$

Se llama foco objeto al punto del eje óptico tal que los rayos que parten de él (o cuyas prolongaciones pasan por él) se refractan paralelamente al eje, y por tanto la imagen se forma en el infinito.

Casi del mismo modo se define el foco imagen, como el punto del eje óptico tal que los rayos refractados de un objeto situado en el infinito pasan por él.

$$f = \frac{n_2}{n_2 - n_1} r$$

$$f = -\frac{n_1}{n_2 - n_1} r$$

La relación entre ambas distancias focales es:

$$\frac{f}{f'} = -\frac{n_1}{n_2}$$

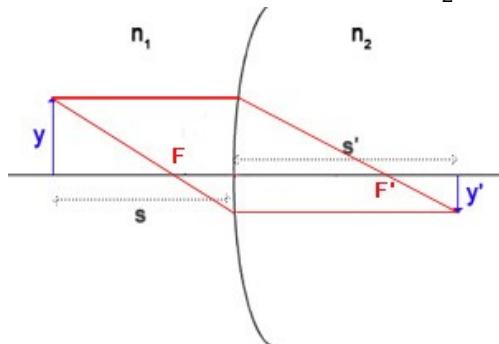
Otra forma útil de expresar la ecuación general del dioptrio se obtiene dividiendo entre su segundo término; la ecuación obtenida se conoce como ecuación de Gauss del dioptrio esférico:

$$\frac{f}{s'} + \frac{f}{s} = 1$$

Construcción de imágenes en los dioptrios: para hacer una representación del modo cómo se forman las imágenes, se sigue un procedimiento gráfico similar al de los espejos, pero teniendo en cuenta que la luz se refracta en lugar de reflejarse. Se utilizan dos de los siguientes tres rayos:

- Un rayo paralelo al eje óptico, que tras refractarse pasa por el foco imagen.
- Un rayo que, pasando por el foco objeto, se refracta paralelo al eje óptico.
- Un rayo que pasa o se dirige directamente al centro del dioptrio no se desvía.

El aumento lateral en los dioptrios viene dado por: $\frac{y'}{y} = \frac{n_1 \cdot s'}{n_2 \cdot s}$



0608. Sistemas ópticos: lentes.

Las lentes son medios transparentes limitados por caras curvas o planas y curvas.

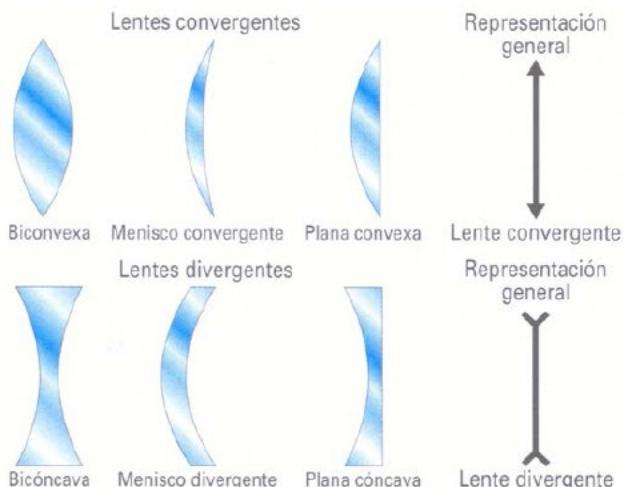
Se clasifican en:

convergentes: Cuando un haz de rayos luminosos, que caminan paralelos al eje del sistema, atraviesa refractándose una lente convergente, se concentra realmente en un punto. Las lentes convergentes pueden ser (figura):

Lentes biconvexas, meniscos convergentes y planoconvexas.

divergentes: Cuando el haz de rayos paralelos, que van paralelos al eje del sistema, atraviesa la lente divergente, tras ella salen divergentes. Pueden ser:

Lentes bicónicas, meniscos divergentes y planocónicas.



Las lentes convergentes siempre son más gruesas por el centro que por los bordes (siempre que el índice de refracción de la lente sea mayor que el del medio que le rodea).

En las lentes convergentes los rayos paralelos al eje se reúnen en un punto llamado foco imagen, y todos los rayos que pasan por un punto llamado foco objeto se refractan paralelos al eje.

En las lentes divergentes los rayos que llegan paralelos al eje se separan con sus prolongaciones pasando por el foco imagen, y todos los rayos cuyas prolongaciones pasan por foco objeto se refractan paralelos al eje.

Aplicando dos veces la ecuación de la refracción en un dioptrio esférico se obtiene la ecuación de refracción en las lentes, que sólo es válida cuando las lentes son delgadas, es decir cuando su

espesor es muy pequeño comparado con sus radios de curvatura:

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

La distancia focal se define como la distancia imagen que corresponde a una distancia objeto infinita. Teniendo en cuenta este concepto se puede dividir la ecuación anterior en dos ecuaciones separadas:

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

Ecuación conocida como "**Ecuación del constructor de lentes**".

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f}$$

Conocida como "**Ecuación de las lentes delgadas**".

Para la construcción de imágenes en lentes delgadas se utilizan los siguientes rayos:

- Rayo paralelo al eje principal, que pasa por el foco imagen.
- Rayo central, que no se desvía (el centro de la lente puede considerarse una lámina de caras planas y paralelas).
- Rayo que pasa por el foco objeto y sale paralelo al eje principal.

La ecuación del aumento lateral en las lentes delgadas es igual que la de los espejos, excepto en el signo:

$$\frac{y'}{y} = \frac{s'}{s}$$

Las lentes se suelen medir por su potencia. Se llama **potencia de una lente** al inverso de su distancia focal medida en metros:

$$P = \frac{1}{f}$$

La unidad en que se mide la potencia de una lente es la dioptría que equivale a m^{-1} . Las lentes convergentes tienen una potencia positiva y las lentes divergentes negativa.

En las lentes se produce un fenómeno de aberración (Formación de imágenes no nítidas) llamado aberración cromática. Consiste en la aparición de manchas con los colores del arco iris y se debe a la diferencia de índice de refracción para las distintas longitudes de onda que componen la luz blanca.

0609. El ojo humano. Defectos de la visión.

El ojo, órgano de la visión, es un globo lleno de líquido de unos 12 mm de radio. Sus partes más importantes se reflejan en la figura .

La luz penetra en el ojo a través de la **córnea**, que es transparente. El **iris** regula la cantidad de luz que entra en el ojo a través de la **pupila**, y el sistema córnea-cristalino enfoca la luz sobre la **retina**, más concretamente sobre la **mancha amarilla** que es la zona más sensible de la retina. La retina está formada por dos tipos de receptores, **los conos y los bastones**, que transmiten la información al cerebro a través del **nervio óptico**.

El cristalino es una lente biconvexa con un índice de refracción igual a 1,43, ligeramente mayor que el del agua. El **humor acuoso** y el **humor vítreo** tienen índices de refracción muy parecidos al del agua.

La mayor desviación de la luz se produce en la córnea debido a que tiene un radio de curvatura pequeño (0,8 cm) y la luz pasa del aire ($n = 1$) al humor acuoso ($n = 1,33$), produciéndose una importante variación del índice de refracción.

El cristalino hace posible el enfoque sobre la retina mediante la acción de los **músculos ciliares** que modifican su curvatura y permiten la visión de los objetos próximos y lejanos. Este proceso se llama **acomodación** del ojo. Para un ojo normal, el punto más próximo que el cristalino puede enfocar en la retina está situado a unos 25 cm del ojo y se llama **punto próximo**. El punto más lejano, que suele ser el infinito para un ojo normal se llama **punto remoto**. El punto próximo varía con la edad, oscilando entre unos 7 cm para los niños y 2 m para las personas ancianas.

En consecuencia, el ojo normal es capaz de formar imágenes nítidas sobre la retina cuando los objetos están situados a una distancia del ojo que oscila entre 25 cm y el infinito, pero en ocasiones el ojo tiene algún defecto que limita este poder de acomodación.

DEFECTOS DE LA VISIÓN

Miopía

El cristalino no enfoca sobre la retina los rayos paralelos procedentes de un objeto lejano. La imagen se forma delante de la retina. Por consiguiente, una persona miope ve los objetos lejanos borrosos: Se debe a que la córnea tiene demasiada curvatura o a que el ojo tiene una longitud mayor que lo normal: Para corregir la miopía se usan lentes divergentes de forma que el foco imagen de la lente coincida con el punto remoto del ojo.

Hipermetropía

Es el defecto opuesto a la miopía. Los rayos de luz procedentes de un objeto próximo al ojo se enfocan en un punto situado detrás de la retina; por consiguiente, los hipermetrópnes ven borrosos los objetos cercanos. El ojo es más corto de lo normal o la córnea es demasiado plana. Se corrige con lentes convergentes.

Presbicia

La presbicia o vista cansada se debe a la disminución del poder de acomodación del ojo. Debido a la edad, los músculos ciliares se debilitan y disminuye la flexibilidad del cristalino, alejándose el punto próximo, por lo que se ven los objetos próximos con dificultad. Se corrige con lentes convergentes.

Astigmatismo

Generalmente se debe a que la córnea no es perfectamente esférica y el ojo no enfoca simultáneamente las líneas horizontales y verticales. También se produce por falta de esfericidad de otros órganos del ojo. Se corrige mediante lentes cilíndricas.

0610. Instrumentos ópticos

La lupa

Es una lente convergente, generalmente biconvexa.

Para ver un objeto con nitidez debemos situarlo a unos 25 cm del ojo (punto próximo). La lupa permite aproximar el objeto al ojo, ampliando el ángulo de visión, de modo que el objeto parece tener mayor tamaño.

El objeto se sitúa dentro de la distancia focal de la lente, aproximadamente en el foco de ésta y se obtiene una imagen virtual, derecha y de mayor tamaño que el objeto.

El aumento obtenido es: $\beta = -s'/s = 0,25 \text{ m/f}$

El microscopio

Cuando la luz pasa por dos o más lentes, el efecto producido puede determinarse si se considera la imagen formada por la primera lente como el objeto de la segunda y así sucesivamente. El aumento total producido por un sistema de lentes es el producto de los aumentos producidos por cada lente: $\beta = \beta_1 \cdot \beta_2$

Un microscopio consta de dos lentes convergentes de pequeña distancia focal. La lente más próxima al objeto se llama objetivo, forma una imagen real, invertida y de mayor tamaño que el objeto. La lente más próxima al ojo se llama ocular y produce una imagen final, virtual, invertida y de mayor tamaño que el objeto. El objeto a examinar se coloca delante del objetivo, a una distancia ligeramente superior a la distancia focal del ocular.

El aumento total del microscopio equivale aproximadamente a:

$$\beta \approx 25 \delta / f'_1 \cdot f'_2$$

siendo δ la distancia entre los focos F'_1 y F'_2 y f'_1 y f'_2 son las distancias focales del objetivo y el ocular.

Esta ecuación puede escribirse en función de las potencias: $\beta \approx -0,25 \delta P_1 P_2$

En la práctica, la longitud δ está limitada por el tamaño del microscopio, suele medir unos 15 cm, y las distancias focales de las lentes son muy pequeñas, unos pocos milímetros, pero tampoco pueden ser excesivamente pequeñas para evitar las aberraciones.

Anteojos y telescopios

Son instrumentos ópticos destinados a la observación de objetos lejanos. Existen varios tipos:

Anteojo astronómico: consta de dos lentes convergentes, de forma que la primera, el objetivo, forma una imagen real e invertida de un objeto lejano (en el infinito) y la segunda, el ocular se coloca de forma que su foco objeto coincide con el foco imagen del objetivo, de forma que se obtiene una imagen virtual e invertida en el infinito. El aumento angular del anteojos viene dado por: $\beta = f'_1/f'_2$

Anteojo terrestre: se pretende conseguir una imagen derecha. Ello puede conseguirse de dos formas: 1) intercalando entre el objetivo y el ocular un par de lentes convergentes que invierten la imagen sin variar su tamaño, en este caso se habla de un **catalejo**. 2) empleando como ocular una lente divergente en el **catalejo de Galileo**.

Telescopios: utilizan un espejo cóncavo (esférico o parabólico) en vez de una lente objetivo, para formar una imagen real de un objeto lejano que luego es observada por el ocular. Tienen la ventaja de que es más fácil de construir un espejo de grandes dimensiones que una lente.

La cámara fotográfica

Es una cámara oscura con una lente convergente en el orificio y una película fotográfica, sensible a la luz, en su interior. Al abrir brevemente el obturador de la cámara la luz procedente de un objeto forma una imagen nítida, real e invertida en la película situada en el foco de la lente.