

6. «Óptica»

- 6.1 Introducción histórica de la Naturaleza de la luz
 - 6.1.1 Teoría corpuscular de Newton
 - 6.1.2 Teoría ondulatoria de la luz
 - 6.1.3 Teoría electromagnética de Maxwell
- 6.2 Modelos de luz
 - 6.2.1 Interferencia de la luz. Experimento de Young de la doble rendija. Analizando interferencia de la doble rendija.
 - 6.2.2 La rejilla de difracción
 - 6.2.3 Difracción por una rendija. Principio de Huygens.
 - 6.2.4 Difracción por una abertura circular.
 - 6.2.5 La onda y el modelo de rayos de luz
- 6.3 Óptica de rayos. El modelo de rayo de luz: objetos, diagrama del rayo, aberturas.
 - 6.3.1 Reflexión
 - 6.3.2 Refracción
 - 6.3.3 Formación de imágenes por refracción
 - 6.3.4 Color y dispersión
 - 6.3.5 Lentes delgadas: trazado los rayos. Lentes convergentes. Imágenes reales. Magnificación. Imágenes virtuales. Lentes divergentes. Combinaciones de lentes. Lentes delgadas: teoría de la refracción.
 - 6.3.6 Lentes delgadas: teoría de la refracción. Lentes. Lentes delgadas: formación de imagen. Aberraciones de la lente
 - 6.3.7 La resolución de los instrumentos ópticos. Resolución
- 6.4 Problemas de "Óptica"

6.1 Introducción histórica de la Naturaleza de la luz

La naturaleza de la luz fue especulada desde la antigüedad por los filósofos, cuando era conocida su propagación rectilínea y reflexión. Así, los primeros escritos sobre óptica se deben a los filósofos y matemáticos griegos [**Empedocles** (490-430 a.C.) y al matemático **Euclides** (300 a.C.).

Descartes (1596-1650) consideró, por sus ideas metafísicas, que la luz era esencialmente una presión transmitida a través de un medio perfectamente elástico (el éter), el cual llena todo el espacio, y atribuyó la diversidad de los colores a movimientos rotatorios con diferentes velocidades de las partículas en este medio.

Hasta después de **Galileo** (1564-1642), que demostró el poder del método experimental, la óptica se aplicó sobre unos fundamentos firmes. Así, la **ley de la reflexión** era conocida desde los griegos pero hasta 1621 **Snell** descubrió la **ley de la refracción**, y En 1657 **Fermat** enunció el principio de tiempo mínimo que considera que la luz sigue siempre el camino que conduce a su destino en el tiempo más corto, y de esta consideración distintos medios tendrán distinta "resistencia" y se deduce la ley de la refracción.

El primer fenómeno de **interferencia**, conocido como "anillos de Newton", fue descubierto independientemente por **Boyle** (1627-1691) y **Hooke** (1635-1703). Hooke también observó la presencia de luz en la sombra geométrica, la **difracción** de la luz, aunque este fenómeno fue observado por Grimaldi (1618-1663).

Hooke fue el primero en considerar que la luz consiste en rápidas **vibraciones** que se propagan instantáneamente, o a una velocidad muy alta, sobre cualquier distancia y considerando que en un medio homogéneo cada vibración generará una esfera que se extenderá uniformemente. Por medio de estas ideas Hooke intentó dar una explicación del fenómeno de la **refracción** y una interpretación de los colores.

La cualidad básica del **color** fue revelada sólo cuando **Newton** (1642-1727) descubrió en **1666** que la luz blanca puede descomponerse en sus colores componentes por medio de un prisma, y encontró que cada color puro se caracteriza por un índice de refracción.

6.1.1 Teoría corpuscular de Newton

Las dificultades que la teoría ondulatoria encontró para explicar la propagación rectilínea de la luz y el fenómeno de la polarización llevaron a Newton a considerar una teoría de la emisión (o corpuscular) en la que se consideraba que la luz se propaga desde un cuerpo luminoso en forma de partículas diminutas.

En el tiempo de la publicación de la **teoría del color de Newton** no era conocido si la luz se propaga o no instantáneamente. El descubrimiento de la velocidad finita de la luz fue realizado en 1675 por Römer desde las observaciones de los eclipses de los satélites de Júpiter.

6.1.2 Teoría ondulatoria de la luz

Entre sus primeros iniciadores se encontraba Hooke, y fue mejorada y extendida por **Huygens** (1629-1695) en su libro “Tratado de la luz” completado en 1678 y publicado en 1690. Enunció el **principio** conocido por su nombre que nos dice que “cada punto del éter sobre el que llega la perturbación luminosa puede convertirse en un centro de nuevas perturbaciones que se propagan en forma de ondas esféricas; estas ondas secundarias se combinan de tal forma que sus envolventes determinan el frente de onda en un tiempo posterior”.

Con ayuda de este principio Huygens **explicó las leyes de la reflexión y de la refracción**. También pudo explicar la **doble refracción** del espato de Islandia (descubierto en 1669 por Bartholinus) considerando que en el cristal hay, además de la onda esférica primaria, una onda elipsoidal secundaria. Fue en el transcurso de esta investigación cuando Huygens hizo el **descubrimiento de la polarización**: “cada uno de los dos rayos que salen de la refracción del espato de Islandia pueden anularse pasando a través de un segundo cristal del mismo material si el segundo cristal está girado alrededor de la dirección del rayo”.

Este fenómeno de la polarización no lo pudo interpretar Newton ya que la interpretación era contraria a la teoría corpuscular de Newton. Según el propio Newton para interpretar estos fenómenos asume que los rayos tienen “lados”, y de hecho esta “transversalidad” le lleva a él a una objeción insuperable para aceptar la teoría ondulatoria, ya que en aquel tiempo los científicos estaban familiarizados sólo con ondas longitudinales (la propagación del sonido).

El rechazo de la teoría ondulatoria por Newton, que poseía una gran autoridad en el mundo científico, la lleva al olvido durante cien años.

Aceptación de la teoría ondulatoria: A principios del siglo XIX se realizó un descubrimiento decisivo que llevó a aceptar la teoría ondulatoria. La primera etapa fue el enunciado en 1801 por **Young** (1773-1829) del principio de interferencia y la explicación de los colores de pequeñas películas.

En esta misma época, en 1808, fue descubierta la **polarización de la luz por reflexión** por **Malus** (1775-1812). Una tarde, desde una ventana acristalada, observó la reflexión del sol a través de un cristal de espato de Islandia, y encontró que las dos imágenes obtenidas por doble refracción varían en intensidad relativa cuando el cristal va rotando alrededor de la línea de visión. **Malus** no encontró explicación de este fenómeno, siendo de la opinión de que las teorías conocidas eran incapaces de dar una explicación.

Mientras tanto, la teoría de la emisión o corpuscular de Newton había sido desarrollada por **Laplace** (1749-1827) y **Biot** (1774-1862). Sus defensores propusieron un galardón en 1818 dado por la Academia de París sobre el tema de la difracción, esperando que un tratamiento de este tema llevaría al triunfo de la teoría de la emisión. Pero sus esperanzas se vieron truncadas, a pesar de una fuerte oposición, el premio fue concedido a Augustin J. **Fresnel** (1788-1827) cuyo tratamiento se basó en la teoría ondulatoria, y fue el primero en realizar una serie de investigaciones que le llevaron, en el curso de unos años, al descrédito completo de la teoría corpuscular.

La esencia de las memorias de **Fresnel** consiste en una síntesis del **principio de construcción de Huygens** con el **principio de interferencia de Young**. Fresnel demostró la propagación rectilínea de la luz y las pequeñas desviaciones de ésta en el fenómeno de difracción. Fresnel calculó la difracción causada por

pequeños objetos, aberturas y pantallas; fue particularmente impresionante la confirmación experimental por **Arago** de una predicción, deducida por **Poisson** desde la teoría de Fresnel, por la que en el centro de la sombra de un disco pequeño circular aparecerá una mancha brillante.

En el mismo año de 1818 Fresnel investigó el problema tan importante de la influencia del movimiento de la Tierra en la propagación de la luz. La cuestión era si existía diferencia entre la luz de las estrellas y la de las fuentes terrestres. Arago (1786-1853) encontró desde experimentos que no hay diferencia entre la luz que viene de las estrellas y la de fuentes terrestres.

Junto con Arago, Fresnel investigó la interferencia de rayos polarizados de luz y encontró en 1816 que dos rayos polarizados hacia la derecha uno del otro nunca interfieren. Este hecho no se podía explicar suponiendo que las ondas son longitudinales. **Young**, que tuvo conocimiento del descubrimiento de Arago, encontró la clave a la solución en 1817 asumiendo que las **vibraciones eran transversales**.

En **1850** se realizó un **experimento crucial** que confirmó **la teoría ondulatoria**. El experimento sugerido por Arago fue realizado por **Foucault, Fizeau y Breguet**. La teoría corpuscular explica la refracción en términos de atracción de los corpúsculos-luz en el límite hacia el medio ópticamente más denso, lo que implica una velocidad mayor en el medio más denso. Sin embargo, en la teoría ondulatoria, aplicando la construcción de Huygens, **se obtiene una velocidad menor en un medio más denso ópticamente**. La medida directa de la velocidad de la luz en aire y agua se decide sin ambigüedad a favor de la teoría ondulatoria.

Las décadas siguientes llevaron al desarrollo de la teoría del éter elástico. Navier desarrolló la teoría considerando que la materia está constituida de partículas muy pequeñas (masa puntuales, átomos) que se ejercen fuerzas a lo largo de las líneas que las unen. Una objeción al éter es explicar cómo se mueven los planetas a velocidades altas por el éter sin que ofrezca resistencia. La explicación de Stokes es que la velocidad de los planetas era muy pequeña comparada con las velocidades de las partículas etéreas en las vibraciones de la luz. En una primera etapa, se consideró la existencia de un éter elástico (MacCullagh en 1880).

A pesar de las dificultades la teoría del éter elástico persistió durante bastantes años y un gran número de físicos del siglo XIX contribuyeron a ella, entre ellos W. Thomson, Neumann y Kirchhoff.

6.1.3 Teoría electromagnética de Maxwell

Mientras tanto, las investigaciones en electricidad y magnetismo se desarrollaban independientemente de la óptica, culminando en el descubrimiento de la inducción electromagnética de Faraday (1791-1867). El fenómeno de la inducción electromagnética indica la posibilidad de transmitir una señal desde un lugar a otro usando un campo electromagnético dependiente del tiempo.

Las ondas electromagnéticas fueron predichas por J.C. Maxwell en 1873 como resultado del análisis realizado con lo que se conoce con el nombre de las ecuaciones de Maxwell o ecuaciones del campo electromagnético. La interacción electromagnética entre las partículas que componen la materia está asociada con una propiedad llamada carga eléctrica. La interacción electromagnética se describe por el campo electromagnético, caracterizado por dos vectores, el campo eléctrico y el campo magnético o de inducción magnética.

Ecuaciones de Maxwell:

1ª: Ley de Gauss para el campo eléctrico:
$$\Phi = \iint_S \vec{E} \cdot \vec{n} dS = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

$$\iint_S \vec{E} \cdot \vec{n} dS = \iiint_V \vec{\nabla} \cdot \vec{E} dV \quad \left\{ \Phi = \iint_S \vec{E} \cdot \vec{n} dS = \frac{Q}{\epsilon_0} = \iiint_V \frac{\rho}{\epsilon_0} dV \right\}$$

$$\left\{ \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\partial}{\partial x} E_x + \frac{\partial}{\partial y} E_y + \frac{\partial}{\partial z} E_z = \frac{\rho}{\epsilon_0} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} \rho = 0 \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \end{array} \right.$$

2ª: Ley de Gauss para el campo magnético $\Phi = \iint_S \vec{B} \cdot \vec{n} dS = 0$

$$\Phi = \iint_S \vec{B} \cdot \vec{n} dS = 0 \quad \left\{ \iint_S \vec{B} \cdot \vec{n} dS = \iiint_V \vec{\nabla} \cdot \vec{B} dV \right\} \quad \left\{ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = \frac{\partial}{\partial x} B_x + \frac{\partial}{\partial y} B_y + \frac{\partial}{\partial z} B_z = 0 \right.$$

3ª: Ley de Lenz-Faraday de la inducción electromagnética: $\epsilon = -\frac{d\Phi_m}{dt} = -\frac{d}{dt} \iint_S \vec{B} \cdot \vec{n} dS$

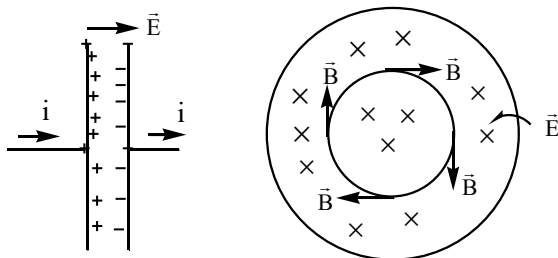
$$\epsilon = \oint_L \vec{E}' \cdot d\vec{l} = \iint_S (\vec{\nabla} \times \vec{E}') \cdot \vec{n} dS = -\frac{d}{dt} \iint_S \vec{B} \cdot \vec{n} dS \quad \left\{ \vec{\nabla} \times \vec{E}' = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right.$$

4ª: Ley de Ampère-Maxwell: $\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \iint_S \vec{E} \cdot \vec{n} dS$

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \iint_S (\vec{\nabla} \times \vec{B}) \cdot \vec{n} dS = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \iint_S \vec{E} \cdot \vec{n} dS \quad \left\{ \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right.$$

La 4ª ley de Ampère-Maxwell es simétrica a la ley de Lenz-Faraday. Por esta última sabemos que la variación de flujo magnético induce un campo eléctrico, y por la ley de Ampère-Maxwell sabemos que la variación de flujo eléctrico induce un campo magnético.

Como ejemplo considera un condensador, de placas paralelas y circulares, que se está cargando con una intensidad, i , de corriente eléctrica. Por lo que entre las placas está aumentando el campo eléctrico. En la figura de la derecha vemos la placa de la derecha del condensador, en la que se representa el sentido del campo eléctrico hacia detrás del papel. Si consideramos un lazo circular concéntrico al capacitor, al estar el campo eléctrico cambiando través del lazo está cambiando también el flujo eléctrico a través del mismo, por lo que se induce un campo magnético alrededor del lazo.



$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \iint_S (\vec{\nabla} \times \vec{B}) \cdot \vec{n} dS = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \iint_S \vec{E} \cdot \vec{n} dS$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Ecuación de onda electromagnética:

Con las ecuaciones de Maxwell 3ª y 4ª, que son dos ecuaciones que varían con el tiempo, son matemáticamente suficientes para obtener separadamente las ecuaciones de onda para los campos eléctrico y magnético, E y B: $\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$, y $\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$.

Estas ecuaciones demuestran que las variaciones de E en tiempo y espacio afectan a B, y viceversa. E y B no pueden considerarse magnitudes aisladas aunque sean independientes.

Consideremos un sistema de ondas planas en el plano XY como aquella región en la que las propiedades ondulatorias son constantes. Estas propiedades no variarán con respecto a X y Y y todas las derivadas $\frac{\partial}{\partial x}$ y $\frac{\partial}{\partial y}$ serán cero:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & E_y & E_z \end{vmatrix} = \left[\frac{\partial}{\partial y} E_z - \frac{\partial}{\partial z} E_y \right] \vec{i} - \left[\frac{\partial}{\partial x} E_z - \frac{\partial}{\partial z} E_x \right] \vec{j} + \left[\frac{\partial}{\partial x} E_y - \frac{\partial}{\partial y} E_x \right] \vec{k}$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial y} E_z - \frac{\partial}{\partial z} E_y \right] \vec{i} - \left[\frac{\partial}{\partial x} E_z - \frac{\partial}{\partial z} E_x \right] \vec{j} + [0] \vec{k} = -\frac{\partial B_x}{\partial t} \vec{i} - \frac{\partial B_y}{\partial t} \vec{j} - \frac{\partial B_z}{\partial t} \vec{k} \quad \left\{ -\frac{\partial B_z}{\partial t} = 0 \right.$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = \frac{\partial}{\partial x} B_x + \frac{\partial}{\partial y} B_y + \frac{\partial}{\partial z} B_z = 0 \quad \left\{ \frac{\partial}{\partial z} B_z = 0 \right\} \quad \{ B_z = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix} = \left[\frac{\partial}{\partial y} B_z - \frac{\partial}{\partial z} B_y \right] \vec{i} - \left[\frac{\partial}{\partial x} B_z - \frac{\partial}{\partial z} B_x \right] \vec{j} + \left[\frac{\partial}{\partial x} B_y - \frac{\partial}{\partial y} B_x \right] \vec{k}$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial y} B_z - \frac{\partial}{\partial z} B_y \right] \vec{i} - \left[\frac{\partial}{\partial x} B_z - \frac{\partial}{\partial z} B_x \right] \vec{j} + [0] \vec{k} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t} \vec{i} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t} \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E_z}{\partial t} \vec{k} \quad \left\{ \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E_z}{\partial t} = 0 \right.$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\partial}{\partial x} E_x + \frac{\partial}{\partial y} E_y + \frac{\partial}{\partial z} E_z = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \{ \rho = 0 \} \quad \left\{ \frac{\partial}{\partial z} E_z = 0 \right\} \quad \{ E_z = 0$$

La ausencia de variación en B_z y E_z significa que las oscilaciones o variaciones en B y E tienen lugar en direcciones perpendiculares a la dirección z. Lo que nos llevará a que las ondas electromagnéticas son ondas transversales. Si añadimos la simplificación de que las ondas están polarizadas eligiendo que el campo E solamente lo haga en el eje x, por lo que $E_y = 0$:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \Rightarrow \left\{ \frac{\partial}{\partial z} E_x \vec{j} = -\frac{\partial B_y}{\partial t} \vec{j} \right\} \quad \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \Rightarrow \left\{ \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t} \vec{i} = -\frac{\partial B_y}{\partial z} \vec{i} \right\}$$

Usando la propiedad: $\frac{\partial^2}{\partial z \partial t} = \frac{\partial^2}{\partial t \partial z}$, obtenemos:

$$\frac{\partial}{\partial t} \Rightarrow \left\{ \frac{\partial^2}{\partial t \partial z} E_x = -\frac{\partial^2}{\partial t^2} B_y \right\} \quad \frac{\partial}{\partial z} \Rightarrow \left\{ \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial z \partial t} E_x = -\frac{\partial^2}{\partial z^2} B_y \right\} \Rightarrow \left\{ \frac{\partial^2}{\partial t^2} B_y = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \frac{\partial^2}{\partial z^2} B_y \right.$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \Rightarrow \left\{ \frac{\partial^2}{\partial z^2} E_x = -\frac{\partial^2}{\partial z \partial t} B_y \right\} \quad \frac{\partial}{\partial t} \Rightarrow \left\{ \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} E_x = -\frac{\partial^2}{\partial t \partial z} B_y \right\} \Rightarrow \left\{ \frac{\partial^2}{\partial t^2} E_x = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \frac{\partial^2}{\partial z^2} E_x \right.$$

Siendo **las ecuaciones de las ondas**: $\left\{ \frac{\partial^2}{\partial t^2} B_y = c^2 \frac{\partial^2}{\partial z^2} B_y \right\} \quad \left\{ \frac{\partial^2}{\partial t^2} E_x = c^2 \frac{\partial^2}{\partial z^2} E_x \right\}$, c es la velocidad de la

onda, que en el vacío es: $c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = \frac{1}{\sqrt{4\pi 10^{-7} \frac{H}{m} \times 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}}} = 2,998 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$.

Las soluciones de las ecuaciones de las ondas electromagnéticas para ondas planas:

$$E_x = E_m \sin \frac{2\pi}{\lambda}(ct - z); \quad B_y = B_m \sin \frac{2\pi}{\lambda}(ct - z)$$

Siendo la relación entre E_x y B_y :

$$\left\{ \begin{array}{l} E_x = E_m \sin \frac{2\pi}{\lambda}(ct - z) \\ B_y = B_m \sin \frac{2\pi}{\lambda}(ct - z) \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} B_y \\ \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{2\pi}{\lambda} c E_x \\ -\frac{\partial}{\partial z} B_y = +\frac{2\pi}{\lambda} B_y \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \mu_0 \epsilon_0 c E_x = B_y \\ E_x = c B_y \\ \epsilon_0 E_x^2 = \frac{1}{\mu_0} B_y^2 \end{array} \right.$$

Intensidad de una onda electromagnética:

Es la cantidad de energía que cruza la unidad de área en la unidad de tiempo.

Para obtener la expresión de la intensidad, I , recordamos que la energía total almacenada en un condensador a un potencial V , siendo A el área de las placas y d la distancia a que se encuentran:

$$U = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon A}{d} \right) E^2 d^2 = \frac{1}{2} (\epsilon E^2) Ad$$

Por lo que la energía eléctrica por unidad de volumen almacenada en el condensador es $\frac{1}{2} \epsilon E^2$, resultado del flujo de energía electromagnética durante el proceso de carga.

Para un dieléctrico la energía eléctrica por unidad de volumen en una onda electromagnética es igual a la energía magnética por unidad de volumen, y la energía total es la suma: $\frac{1}{2} \epsilon E_x^2 + \frac{1}{2} \frac{1}{\mu} B_y^2$. Esta expresión nos da el valor instantáneo de la energía por unidad de volumen, por lo que el valor promedio de la energía por unidad de volumen es:

$$U = \frac{1}{2} \epsilon \bar{E}_x^2 + \frac{1}{2} \frac{1}{\mu} \bar{B}_y^2 = \frac{1}{4} \epsilon E_m^2 + \frac{1}{4} \frac{1}{\mu} B_m^2 = \frac{1}{2} \epsilon E_m^2 \quad \left\{ \frac{E}{m} \times \frac{V^2}{m^2} = \frac{J}{m^3} \right.$$

Siendo la Intensidad igual a:

$$\text{Intensidad} = \frac{\text{Flujo}}{\text{Superficie}} = \frac{U}{S} \equiv \frac{\frac{J}{s}}{m^2} = \frac{W}{m^2} = \frac{\frac{J}{s} \cdot m}{m^2 \cdot m} = \frac{J}{m^3} \frac{m}{s}$$

$$I = \frac{1}{2} \epsilon E_m^2 c \quad \left\{ I = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_m^2 = \frac{1}{2} c \frac{1}{\mu_0} B_m^2 \frac{W}{m^2} \right.$$

Cuando Kohlrausch (1809-1858) y Weber (1804-1891) realizaron en 1856 estas medidas la velocidad coincidía con la de la luz. Esto llevó a Maxwell a considerar que las ondas de luz son ondas electromagnéticas; esta consideración fue verificada por experimentación en 1888 por Hertz (1857-1894). A pesar de esto, la teoría electromagnética de Maxwell tuvo que realizar una gran lucha para su aceptación general.

*La teoría electromagnética de la luz es capaz de explicar, en sus principales características, todos los fenómenos relacionados con la propagación de la luz. Sin embargo, **falla** al explicar los procesos de emisión y absorción, en la cual las características de la interacción entre materia y campo óptico se ponen de manifiesto.*

Las leyes que gobiernan estos procesos son el objeto de la óptica moderna y por tanto de la física moderna. Su historia comienza con el descubrimiento de ciertas regularidades en espectros. La primera etapa se debe a Fraunhofer, que descubrió en 1815 las líneas oscuras del espectro solar, y su interpretación como líneas

de absorción, dada en 1861 por Bunsen y Kirchhoff, sobre la base de experimentos. La luz del espectro continuo del conjunto del sol, pasando los gases enfriados de la atmósfera solar, pierde por absorción justo aquellas longitudes de onda que son emitidas por los gases. Este descubrimiento fue el comienzo del análisis espectral que se basa en el reconocimiento que cada elemento químico gaseoso posee un espectro de líneas característico.

El problema de cómo la luz se produce y se destruye en los átomos no es exclusivo de una naturaleza óptica sino que implica también la mecánica del propio átomo; y las leyes de las líneas espectrales no revelan mucho la naturaleza de la luz y sí de la estructura de las partículas emisoras. Así, la **espectroscopia** proporciona los cimientos empíricos para la física de átomos y moléculas.

Los métodos de la mecánica clásica son inadecuados para la descripción de los fenómenos que ocurren dentro de los átomos y se sustituyen por la **mecánica cuántica**, que se originó en 1900 por Max Planck. Sus aplicaciones a la estructura atómica, llevaron en 1913, a la explicación por Bohr de la sencilla ley de las líneas espectrales de los gases.

El concepto de "**Naturaleza de la Luz**" **ha sido muy influenciado por la teoría cuántica**. En una primera forma debido a Planck aparece una proposición que es contraria a las ideas clásicas, a saber un sistema eléctrico oscilando no da su energía al campo electromagnético de una manera continua sino en cantidades finitas o "cuantos", que son proporcionales a la frecuencia de la luz, siendo la constante de proporcionalidad la constante de Planck.

Sobre la base de la teoría de Planck, **Einstein (1879-1955) en 1905** hizo revivir la **teoría corpuscular de la luz** de una nueva forma, considerando que la energía de los cuantos de Planck existen como partículas-luz reales, llamados "cuantos de luz" o **fotones**. Con esta teoría se explican los fundamentos del fenómeno fotoeléctrico y fotoquímico, que son inexplicables con la teoría ondulatoria.

En fenómenos de este tipo la luz no comunica a una partícula una energía proporcional a su intensidad, como expresa la teoría ondulatoria. La energía comunicada a otras partículas es independiente de la intensidad y depende sólo de la frecuencia de la luz.

6.2 Modelos de luz

La luz es una entidad física real, pero su naturaleza es escurridiza. Se dice que la luz es el camaleón del mundo físico. En algunas circunstancias actúa como partícula viajando en línea recta. Pero cambiando las circunstancias la luz se comporta como una onda como las ondas del sonido. Cambiando las circunstancias la luz tiene un comportamiento dual que no es ni onda ni partícula sino que tiene características de los dos.

Por lo que en vez de desarrollar una teoría de la luz es mejor hablar de modelos de luz. Cada modelo explica el comportamiento de la luz dentro de un cierto dominio, esto es dentro de un cierto rango de situaciones físicas. Por lo que tendremos dos ejes:

1. Desarrollar claramente los modelos distintos de luz.
2. Aprender las condiciones y circunstancias en las que cada modelo es válido.

Los tres modelos son:

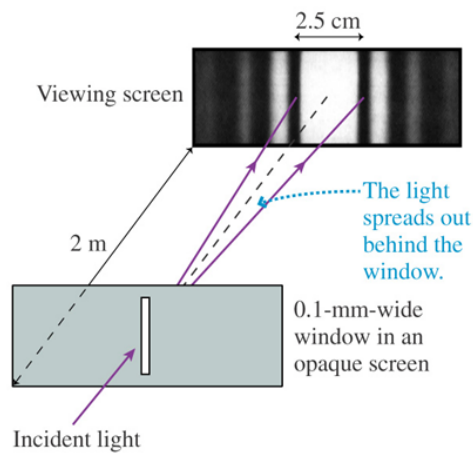
1. El **modelo onda**: El modelo onda de luz es el modelo de luz más aplicable, responsable del hecho tan conocido de que la luz es una onda. Esto es cierto pero bajo muchas circunstancias. La luz se comporta igual que el sonido o las ondas de agua. Los láseres y los aparatos electro-ópticos son bien conocidos en términos del modelo ondulatorio de la luz. El estudio de la luz como una onda, superposición, se llama óptica ondulatoria. Ya se ha estudiado en el tema de ondas.
2. El **modelo rayo**: Del mismo modo es bien conocido el hecho de que la luz viaja en línea recta. Estos caminos en línea recta se llaman rayos de luz. Newton consideró que los rayos de luz son las trayectorias de los corpúsculos de luz tipo partículas. Las propiedades del prisma, los espejos, las lentes, y los instrumentos ópticos como telescopios y microscopios son conocidos en términos de rayos de luz. Desafortunadamente es difícil reconciliar el hecho de que "la luz viaja en línea recta" con el hecho de que "la luz es una onda", ya que rayos y ondas son modelos excluyentes de la luz. Por lo que es importante aprender cuando aplicar un modelo u otro.
3. El **modelo fotón**: La tecnología moderna depende cada vez más de la física cuántica. En el mundo cuántico la luz se comporta como ninguno de los dos, ni onda ni partícula. La luz consta de fotones que tienen propiedades de las dos, onda y partícula. Los fotones son los cuanta de luz. La palabra procede del latín *Quantum* (plural *Quanta*) que representa una cantidad de algo.

6.2.1 Interferencia de la luz

Si la luz pasa a través de una rendija, de 0,1 mm de ancho (dos veces el tamaño de un pelo humano), en una pantalla opaca se observa que en una placa fotográfica, colocada a 2 m, la luz se dispersa por detrás de la rendija formando una figura de difracción de unos 2,5 cm de anchura.

Si la luz consistiera de corpúsculos viajando en línea recta debería verse, en la placa fotográfica, una franja de luz de unos 0,1 mm de ancho, y no una banda de luz extendida en unos 2,5 cm de ancho. Por lo que la luz se dispersa por detrás de la rendija de 0,1 mm de ancho. En este experimento la luz está manifestando una desviación del rayo luminoso, una difracción.

La luz, como una onda de agua, se dispersa por detrás de un agujero si este es suficientemente pequeño. Este hecho no era conocido por Newton, las rendijas inferiores a 0,5 mm son difíciles de hacer.

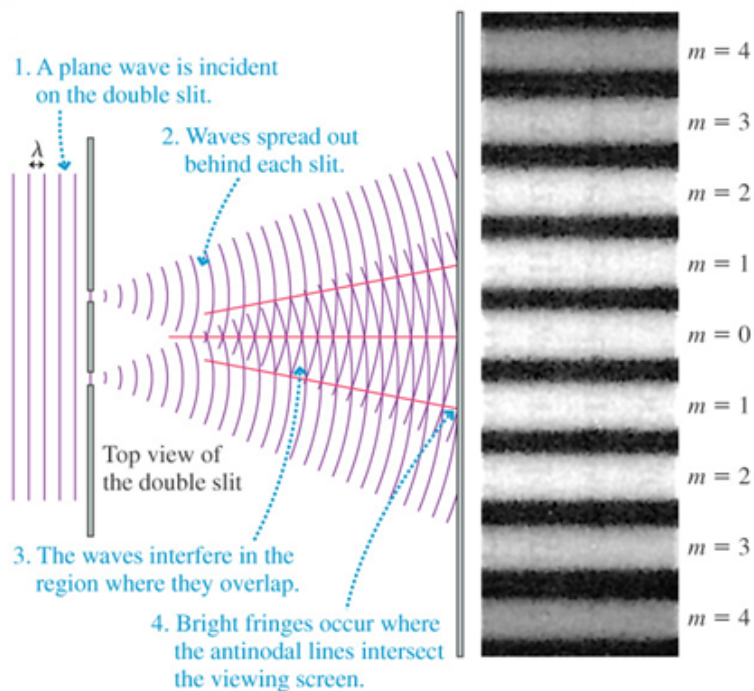


Experimento de Young de la doble rendija:

Si en vez de un agujero ponemos dos en una pantalla opaca, este par de rendijas de 0,1 mm de ancho y separadas unos 0,5 mm forman el experimento de la doble rendija.

Si un rayo láser ilumina las dos rendijas por igual, estamos haciendo el experimento de Young de 1801, aunque utilizó luz solar. Detrás de la pantalla la luz se dispersa por detrás de cada rendija y las dos ondas dispersas solapan en la región entre los agujeros y la pantalla fotográfica. El resultado es que en la placa fotográfica se observan franjas brillantes y franjas oscuras alternas ocupando una región de 2 a 3 cm de ancho. Estas franjas son llamadas las franjas de interferencia, las brillantes son las de interferencia constructiva. Las rendijas actúan como fuentes de ondas idénticas.

Si d es la separación entre las rendijas y L es la distancia entre la pantalla opaca de la doble rendija y la pantalla con la placa fotográfica. Considera que L es mucho mayor que d .



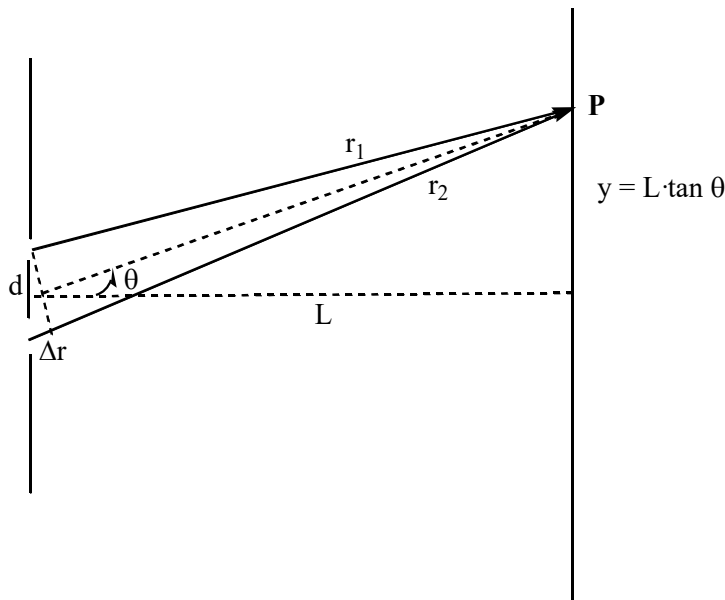
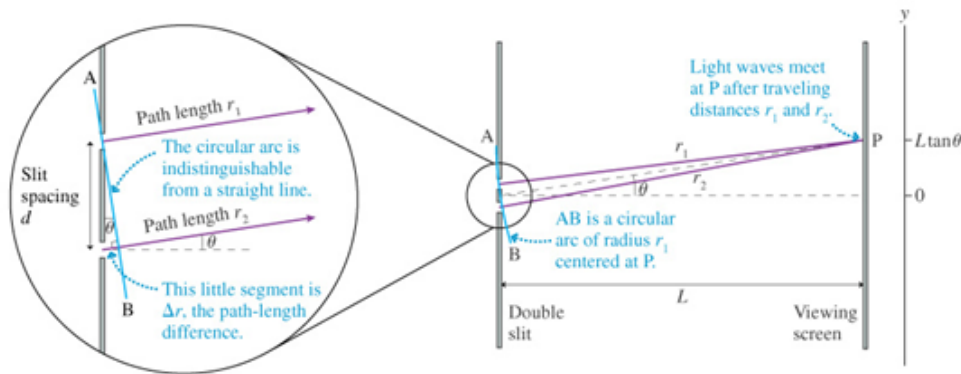
Analizando interferencia de la doble rendija:

La interferencia constructiva entre las ondas de la misma fuente tiene lugar en los puntos en los que la diferencia del camino de la onda sea un entero de la longitud de onda:

$$\Delta r = n\lambda \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots)$$

Así la interferencia es constructiva en el punto P, produciendo una franja brillante, si se cumple en el punto que $\Delta r = n\lambda$. En el punto medio de la pantalla ($y = 0$) la distancia desde las dos rendijas es la misma ($\Delta r = 0$).

La interferencia constructiva produce una franja brillante, identificada como el máximo central. La diferencia en la longitud de camino se incrementa cuando nos alejamos del centro de la pantalla, en $n = 1$ la franja tiene lugar en $\Delta r = \lambda$. Esto es, una onda ha viajado exactamente una longitud de onda más que la otra. En general, **la n ésima franja brillante tiene lugar cuando una onda ha viajado n longitudes de onda más que la otra y así $\Delta r = n\lambda$.**



Para encontrar las posiciones específicas sobre la pantalla, donde $\Delta r = n\lambda$, dibujamos un arco circular de radio r_1 centrado en el punto P, siendo $\Delta r = r_2 - r_1 = d \sin \theta$. Las franjas brillantes (interferencia constructiva) tienen lugar en ángulos θ_n que cumplan:

$$\Delta r = r_2 - r_1 = d \operatorname{sen} \theta_n = n\lambda \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots)$$

El subíndice n nos indica que θ_n es el ángulo de la n -ésima franja brillante, partiendo de $n = 0$ en el centro.

En la práctica el ángulo en un experimento de doble rendija es muy pequeño ($< 1^\circ$). Por lo que podemos considerar que $\operatorname{sen} \theta \approx \theta$, expresando el ángulo en radianes

$$\Delta r = d \operatorname{sen} \theta_n \approx d\theta_n = n\lambda \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Ángulos de franjas brillantes: $\theta_n = n \frac{\lambda}{d}$. Nos da las posiciones angulares en radianes de las franjas brillantes en las figuras de interferencia.

Usualmente es más conveniente medir la **posición de las franjas brillantes** desde el centro de la pantalla:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tan \theta_n = \frac{y_n}{L} \\ \theta_n = n \frac{\lambda}{d} \end{array} \right\} \quad \tan \theta \approx \theta \quad \left\{ \theta_n \approx \tan \theta_n = \frac{y_n}{L} = n \frac{\lambda}{d} \right\} \Rightarrow y_n = n \frac{\lambda L}{d}$$

La figura de interferencia es simétrica, hay franjas brillantes a la misma distancia a ambos lados del centro. Así **para $n = 1$ las franjas tienen lugar en puntos sobre la pantalla donde la luz desde una rendija viaja exactamente una longitud de onda más rápido que la luz desde la otra rendija.**

La ecuación $y_n = n \frac{\lambda L}{d}$ predice que la figura de interferencia es una serie de líneas brillantes igualmente espaciadas sobre la pantalla. Ahora bien, ¿cómo conocemos que las franjas están espaciadas por igual?. El **espaciado entre franjas** entre la franja n y la franja $(n + 1)$ es:

$$\Delta y = y_{n+1} - y_n = \frac{(n+1)\lambda L}{d} - \frac{n\lambda L}{d} = \frac{\lambda L}{d}$$

Como Δy es independiente de m , dos franjas brillantes están espaciadas igualmente.

Interferencia destructiva: Las franjas negras en la fotografía son bandas de interferencia destructiva que tienen lugar en posiciones donde la diferencia de longitud de camino de las ondas es un semientero de la longitud de onda, y siendo y' la posición de las franjas negras:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta r = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda \\ \Delta r = d \operatorname{sen} \theta_n = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots) \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \operatorname{sen} \theta_n \approx \theta_n \\ \Delta r \approx d \cdot \theta_n = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda \end{array} \right\} \quad \theta_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{d}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \tan \theta_n = \frac{y'_n}{L} \\ \theta_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{d} \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \tan \theta_n \approx \theta_n \\ \theta_n \approx \tan \theta_n = \frac{y'_n}{L} = \left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{d} \end{array} \right\} \Rightarrow y'_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda L}{d}$$

Las franjas negras están localizadas a la mitad de camino entre las franjas brillantes.

Ejemplo 1°.- La luz de un láser helio-neón ($\lambda = 633 \text{ nm}$) ilumina dos rendijas separadas $0,40 \text{ mm}$. La pantalla está a $2,0 \text{ m}$ detrás de las rendijas. Cuáles son las distancias entre las $n = 2$ franjas brillantes y entre las dos $n = 2$ franjas negras.

Solución:

$$y_n = n \frac{\lambda L}{d} = 2 \times \frac{(633 \cdot 10^{-9} \text{ m} \times 2 \text{ m})}{0,40 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 2 \times 0,003165 \text{ m} = 6,3 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 6,3 \text{ mm}$$

$$y'_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda L}{d} = \left(2 + \frac{1}{2}\right) \frac{(633 \cdot 10^{-9} \text{ m} \times 2 \text{ m})}{0,40 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 2,5 \times 0,003165 \text{ m} = 7,9 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 7,9 \text{ mm}$$

Cada una de las franjas a $n = 2$ está a $6,3 \text{ mm}$ desde el máximo central, siendo la distancia entre las dos franjas brillantes de $12,6 \text{ mm}$. Y para las franjas negras están localizadas a $7,9 \text{ mm}$ y la distancia entre ellas es de $15,8 \text{ mm}$.

Ejemplo 2°.- La figura de interferencia de la doble rendija se observa sobre una pantalla a $1,0 \text{ m}$ detrás de las dos rendijas separadas $0,30 \text{ mm}$. Diez franjas brillantes se expanden en una distancia de $1,65 \text{ cm}$. Determina la longitud de onda de la luz.

Solución:

Hacemos uso del hecho de que la separación entre las franjas Δy es uniforme. Diez franjas brillantes tienen nueve espacios entre ellas, por lo que el espaciado es:

$$\Delta y = \frac{1,65 \text{ cm}}{9} = 0,18333 \text{ cm} = 1,83 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

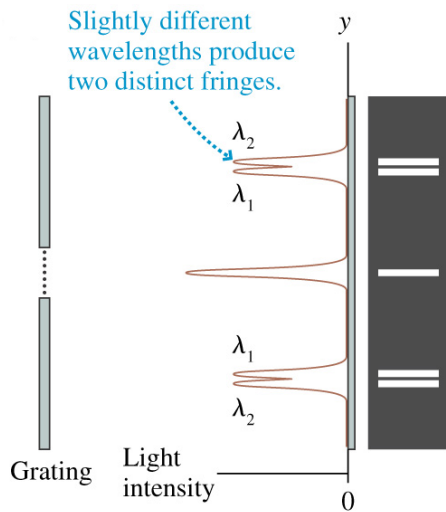
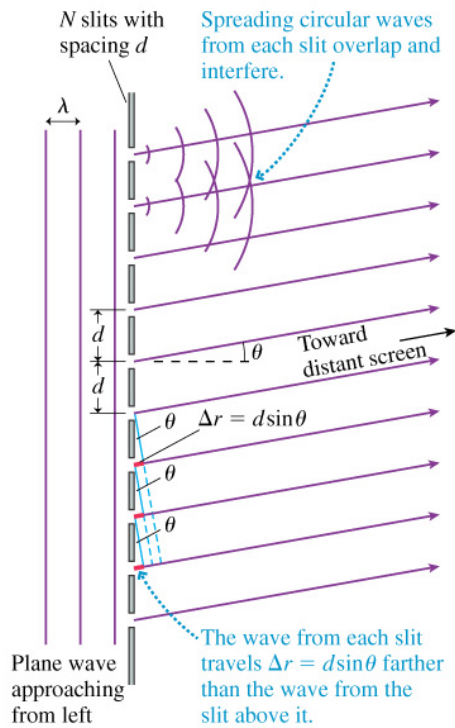
$$\Delta y = y_{n+1} - y_n = \frac{(n+1)\lambda L}{d} - \frac{n\lambda L}{d} = \frac{\lambda L}{d}$$

$$\lambda = \frac{d}{L} \Delta y = \frac{0,30 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{1 \text{ m}} 1,83 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 550 \text{ nm}$$

6.2.2 La rejilla de difracción

Ahora se sustituye la doble rendija con una pantalla opaca que tiene N rendijas muy próximas. Cuando se ilumina desde un lado, cada una de las rendijas será la fuente de una onda de luz que difracta, o desparrama detrás de la rejilla. Como el artefacto es una multi-rendija se llama rejilla de difracción. La intensidad de la luz sobre la pantalla posterior es una rejilla de difracción que es debida a la interferencia de N ondas solapando.

Como las franjas brillantes de la rejilla de difracción son mucho más nítidas y distintas que las franjas de una doble rendija se utilizan para medir las longitudes de onda de la luz. Si suponemos que la luz incidente consiste de dos longitudes de onda muy próximas, cada longitud de onda será difractada a un ángulo distinto, pero si N es suficientemente grande se verán dos franjas distintas sobre la pantalla. Como se ve en la figura:



Ejemplo 3º.- La luz desde una lámpara de sodio pasa a través de una rejilla de difracción que tiene 1.000 rendijas por milímetro. La interferencia se observa sobre una pantalla a 1,0 m detrás de la rejilla. Se observan dos franjas brillantes amarillas que son visibles a 72,88 cm y 73,00 cm desde el máximo central. Cuáles son las longitudes de onda de estas dos franjas.

Solución:

Las dos franjas están muy próximas por lo que las longitudes de onda han de ser muy parecidas. Como no hay otras franjas además de las amarillas asumimos que estas franjas son las de la difracción de primer orden ($n = 1$).

La distancia y_n de una franja brillante desde el máximo central se relaciona con el ángulo de difracción por: $y_n = L \cdot \tan \theta_n$. Por lo que los ángulo de difracción de estas dos franjas son:

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{y_1}{L}\right) = \begin{cases} \theta_1 = \arctan\left(\frac{0,7288 \text{ m}}{1 \text{ m}}\right) = 36,08^\circ \\ \theta_1 = \arctan\left(\frac{0,730 \text{ m}}{1 \text{ m}}\right) = 36,13^\circ \end{cases}$$

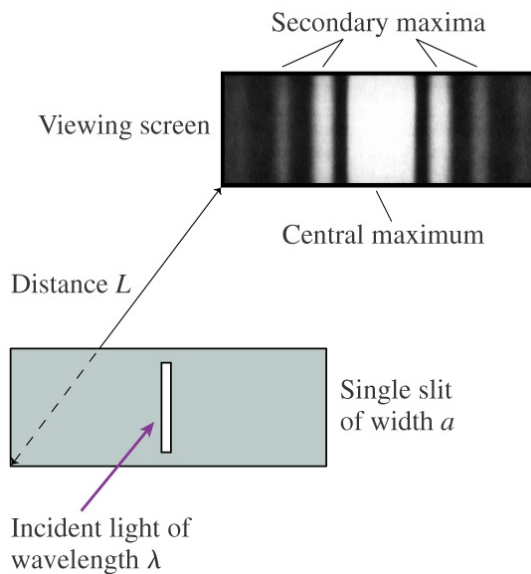
$$\Delta r = d \sin \theta_n = n\lambda \Rightarrow d \sin \theta_1 = 1 \cdot \lambda \Rightarrow \lambda = d \sin \theta_1 \quad \left\{ d = \frac{1 \text{ mm}}{1.000} = 10^{-3} \text{ mm} = 10^{-6} \text{ m} \right\}$$

$$\lambda = d \sin \theta_1 \quad \begin{cases} \lambda_1 = 10^{-6} \text{ m} \times \sin 36,08^\circ = 5,889 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 588,9 \text{ nm} \\ \lambda_2 = 10^{-6} \text{ m} \times \sin 36,13^\circ = 5,8961 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 589,6 \text{ nm} \end{cases}$$

La ciencia que mide las longitudes de onda de las emisiones atómicas y moleculares se llama espectroscopia.

6.2.3 Difracción por una rendija

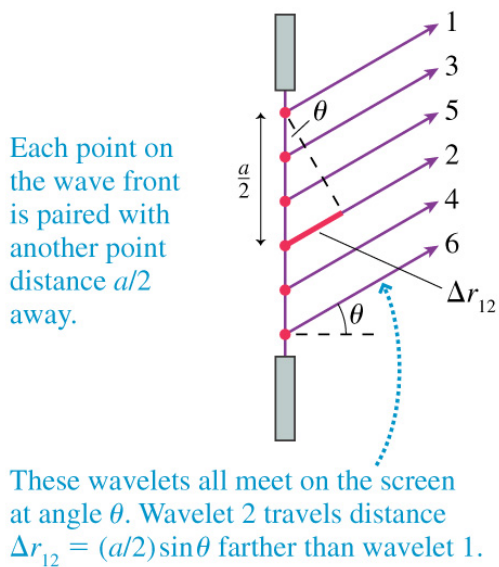
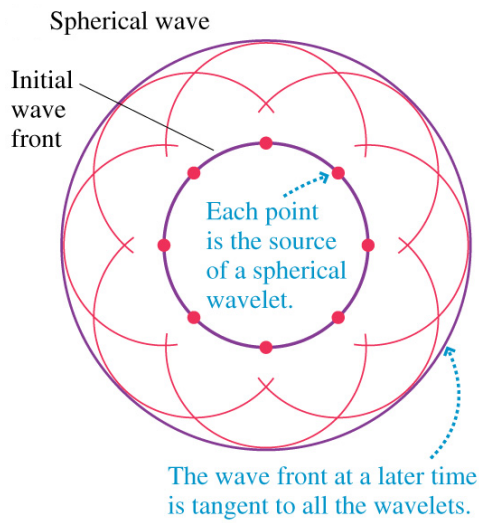
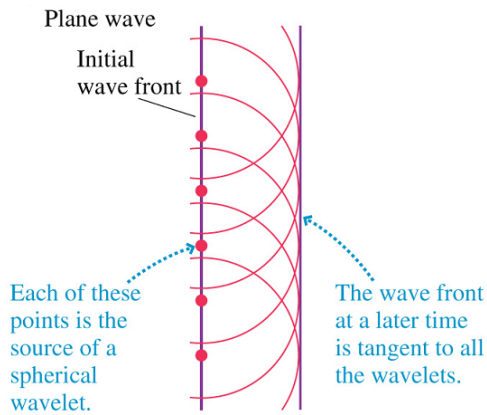
Difracción: Cuando una onda de agua pasa a través de un agujero en una barrera, entonces se desparrama hacia el otro lado. Cuando la luz pasa a través de una rendija muy estrecha también se desparrama hacia el otro lado. Este fenómeno se llama difracción.



Principio de Huygens:

Alemán contemporáneo de Newton que consideró la luz como una onda: Vivió antes del desarrollo de la teoría matemática de las ondas, por lo que desarrolló un modelo geométrico de propagación de las ondas. Su idea tiene dos etapas:

1. Cada punto sobre un frente de onda es una fuente de ondas esféricas que se desparraman en la dirección de la velocidad de la onda.
2. En un tiempo posterior, la forma del frente de onda es la línea tangente a todas las nuevas ondas.



En la figura tenemos 6 nuevas ondas pero la conclusión es válida para cualquier número. La idea clave es que cada punto sobre el frente de onda puede ser apareado con otro punto que está a una distancia $a/2$. Si la diferencia en la longitud de camino es $\lambda/2$, las nuevas ondas que se originen en estos dos puntos llegarán

a la pantalla fuera de fase y interferirán destructivamente. Cuando sumamos los desplazamientos de todas las N ondas, par a par, será cero. La pantalla se verá negra.

$$\Delta r_{12} = \frac{a}{2} \cdot \text{sen } \theta_1 = \frac{\lambda}{2}$$

La diferencia de longitud de camino $\lambda/2$ será la condición para interferencia destructiva. O equivalentemente: $a \cdot \text{sen } \theta_1 = \lambda$.

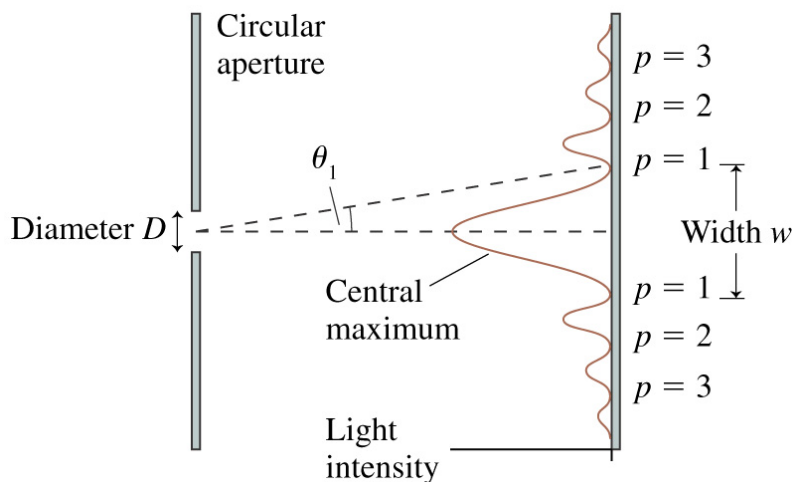
La condición anterior no se cumple si el ancho de la rendija a es menor que la longitud de onda λ . Si la onda pasa a través de una abertura menor que la longitud de onda, el máximo central de la figura de difracción se expande hasta llenar completamente el espacio detrás de la abertura.

6.2.4 Difracción por una abertura circular

La difracción ocurre si una onda pasa a través de una abertura que tenga cualquier forma. La difracción por un rendija establece las ideas básicas de la difracción, pero una situación corriente de importancia práctica es la difracción de una onda por una abertura circular. La difracción circular es matemáticamente más compleja que la difracción desde una rendija, y veremos los resultados sin su demostración.

Algunos ejemplos. Un cono de altavoz genera sonido por una rápida oscilación de un diafragma, pero la onda de sonido debe pasar a través de una abertura circular definida por el borde externo del cono del altavoz y viaja más allá por la habitación. Esto es una difracción por una abertura circular. Los telescopios y microscopios son lo inverso. Las ondas de luz desde el exterior necesitan entrar en el instrumento. Para hacerlo deben pasar a través de una lente de entrada circular. De hecho, el límite de rendimiento del instrumento óptico se determina por la difracción de la abertura circular a través de la cual las ondas pueden pasar.

En la figura tenemos una abertura de diámetro D . Las ondas de luz pasan a través de esta abertura y generan las figuras de difracción circular. La figura tiene un máximo central, ahora circular y una serie de franjas brillantes secundarias.



El ángulo θ_1 localiza el primer mínimo en la intensidad, donde hay una interferencia destructiva total. Un análisis matemático de la difracción circular nos lleva a

$$\theta_1 = \frac{1,22 \lambda}{D}$$

Esta ecuación es válida para aproximación de ángulo pequeño, lo que es válido para difracción de luz pero no lo es para difracción de sonido que son ondas de longitud de onda mayores.

Dentro de la aproximación de ángulo pequeño, la anchura del máximo central es:

$$w = 2y_1 = 2L \tan \theta_1 \approx \frac{2,44\lambda L}{D}$$

El diámetro de la figura de difracción se incrementa con la distancia L pero decrece si el tamaño D de la abertura se incrementa.

6.2.5 La onda y el modelo de rayos de luz

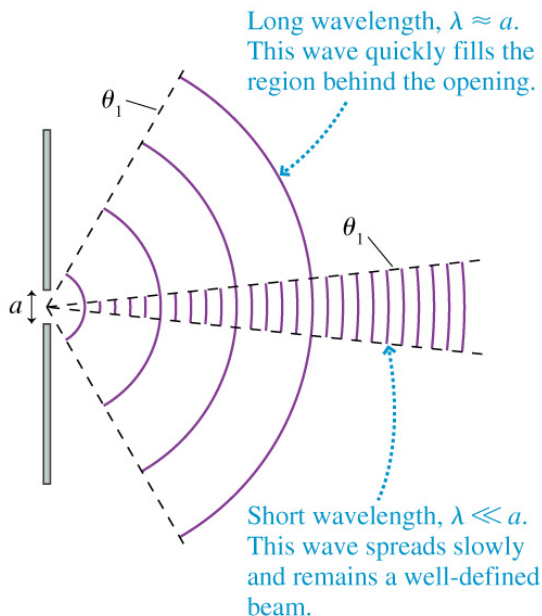
Hay tres modelos de luz, cada uno es útil dentro de un rasgo de circunstancias. Ahora en este punto vamos a establecer una condición importante que separa el modelo de onda luz del modelo de rayo de luz.

Cuando la luz pasa a través de una abertura de tamaño a el ángulo del primer mínimo de difracción es:

$$\Delta r_{12} = \frac{a}{2} \cdot \sin \theta_1 = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow a \cdot \sin \theta_1 = \lambda \Rightarrow \theta_1 = \arcsen \frac{\lambda}{a}$$

La ecuación es para una rendija pero es similar si a es el diámetro de una abertura circular. Independientemente de la forma de la abertura, el factor que determina la cantidad de una onda que se desparrama detrás de una abertura es la relación entre la longitud de onda y el tamaño de la abertura: (λ/a).

En la figura se ilustra la diferencia entre una onda cuya longitud de onda es mucho menor que el tamaño de la abertura y una segunda onda cuya longitud de onda es comparable con la abertura.



Una onda con $\lambda/a \approx 1$ rápidamente se desparrama para llenar la región detrás de la abertura. Las ondas de luz como tienen una longitud de onda corta, casi siempre tienen $\lambda/a \ll 1$ y la difracción produce un pequeño desparramo o difusión del chorro de luz.

Ahora podemos apreciar el dilema de Newton. Con el tamaño de aberturas que observamos tanto el sonido como las ondas de agua tienen $\lambda/a \approx 1$ y la difracción llena el espacio detrás de la abertura.

Consecuentemente esto es lo que esperamos del comportamiento de las ondas. Newton no vio evidencias de esto para la luz al pasar por aberturas. La difracción comienza a verse cuando el tamaño de la abertura es una fracción un milímetro o menor. Si queremos que la onda de luz se difracte y llene el espacio detrás de la abertura ($\theta_1 \approx 90^\circ$), como lo hace una onda de sonido necesitamos reducir el tamaño de la abertura a $\approx 0,001$ mm. Aunque estos agujeros se pueden hacer hoy la cantidad de luz que puede pasar es muy pequeña y su intensidad es demasiado débil para ser vista por el ojo humano.

Si la luz pasa a través de un agujero de diámetro D . De acuerdo al modelo de rayo, los rayos de luz pasan a través del agujero viajando en línea recta para crear sobre la pantalla una imagen brillante de diámetro D . Esta es la imagen geométrica de la rendija. En la realidad experimental la difracción es la causa de que la luz se desparrame o propague por detrás de la rendija, pero **no se notará este desparramo o propagación si es menor que el diámetro D de la imagen geométrica.**

Esta idea nos proporciona un criterio para usar óptica de rayo y cuando usar óptica ondulatoria:

- Si el desparramo debido a la difracción es menor que el tamaño de la abertura usa el modelo de rayo y piensa que la luz está viajando en línea recta.
- Si el desparramo debido a la difracción es mayor que el tamaño de la abertura, usa el modelo ondulatorio de la luz.

El punto que cruza entre estos dos modelos tiene lugar cuando el desparramo debido a la difracción es igual al tamaño de la abertura. El límite viene marcado por la ecuación: la anchura del máximo central de la figura de difracción de una abertura circular es $w = 2,44 \cdot \lambda L / D$. Si igualamos esta anchura de difracción al diámetro de la abertura:

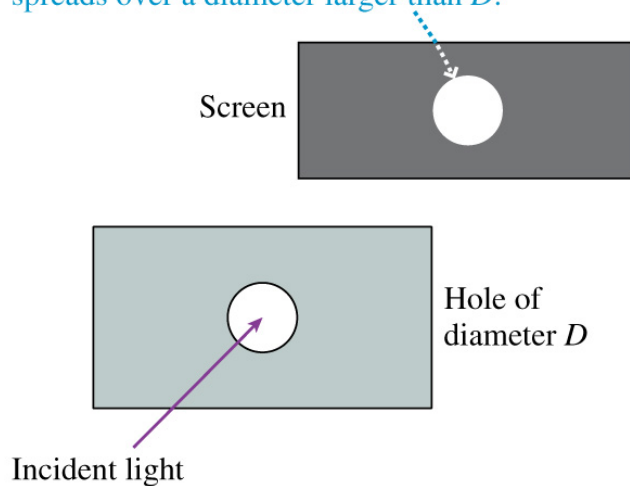
$$w = \frac{2,44\lambda L}{D_{\text{límite}}} = D_{\text{límite}} \Rightarrow D_{\text{límite}} = \sqrt{2,44\lambda L} \quad \left\{ \begin{array}{l} \lambda_{\text{visible}} \approx 500 \text{ nm} \\ L = 1 \text{ m} \end{array} \right.$$

$$D_{\text{límite}} = \sqrt{2,44 \times 500 \cdot 10^{-9} \text{ m} \times 1 \text{ m}} = 0,00110 \text{ m} \approx 1 \text{ mm}$$

Luego para usar el modelo de rayos o el modelo ondulatorio dependerá de la precisión de los valores de λ y L . Los espejos y las lentes están casi siempre en 1 mm de tamaño, por lo que se estudian con el modelo de rayos.

La óptica ondulatoria se hace con objetos de abertura inferior a 1 mm.

If light travels in straight lines, the image on the screen is the same size as the hole.
Diffraction will not be noticed unless the light spreads over a diameter larger than D .



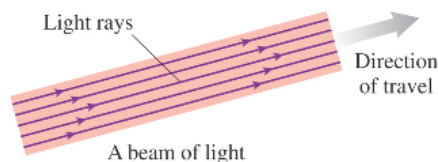
6.3 Óptica de rayos. El modelo de rayo de luz: objetos, diagrama del rayo, aberturas.

Hasta ahora hemos estudiado que hay tres modelos de luz pero hemos hecho más énfasis en la óptica ondulatoria de la interferencia y la difracción. A partir de aquí analizaremos la óptica de los espejos y las lentes en términos de trayectorias rectilíneas de la luz, es decir, óptica de rayos, que tiene gran aplicación práctica.

Nuestra experiencia diaria nos dice que la luz viaja en línea recta y esta es la idea básica del modelo de rayo de luz.

El modelo de rayo de luz es una simplificación de la realidad pero es muy útil dentro de su rango de validez. En particular el modelo de rayo de luz es válido siempre y cuando cualquier abertura por la que pasa la luz sea muy grande comparada con su longitud de onda (lentes, espejos). Con esas aberturas la difracción y otros aspectos ondulatorios se pueden ignorar. Hemos visto que la frontera está en la abertura de 1 mm de diámetro. Las lentes y los espejos tienen una abertura mayor por lo que el modelo de rayo de luz es muy bueno para la óptica práctica de formación de imágenes.

Definimos un rayo de luz como una línea en la dirección en la que la energía de la luz está fluyendo. Un rayo de luz es una idea abstracta no una entidad física. Cualquier chorro estrecho de luz como un láser es un paquete de muchos rayos paralelos.



El modelo de rayo de luz asume que:

- Los rayos de luz viajan en línea recta. Siendo la velocidad $v = c/n$.
- Los rayos de luz pueden cruzarse. Los rayos de luz no interactúan y pueden cruzarse sin ser afectado su camino.

- Un rayo de luz viaja siempre a menos que interactúe con la materia. La materia hace que el rayo cambie de dirección o sea absorbido. La luz interactúa con la materia de cuatro formas: en la superficie de separación entre dos materiales es reflejada o refractada y dentro de un material es dispersada o absorbida.
- Un objeto es una fuente de rayos de luz. Los rayos se originan desde cada punto sobre el objeto y cada punto envía rayos en todas direcciones. No hacemos distinción entre objetos auto-luminosos y objetos reflexivos o que reflejan.
- El ojo ve por focalizar o concentrar un paquete de rayos que divergen, es decir, que se van separando. El ojo ve un objeto cuando un paquete de rayos divergentes desde cada punto sobre el objeto entra en la pupila y son focalizados a una imagen sobre la retina.

Objetos:

Un objeto puede ser auto-luminoso (sol, llama, bombilla) o reflexivos. Muchos objetos son reflexivos, así un árbol puede ser visto o fotografiado por la luz del sol que refleja.

Desde un objeto se emiten los rayos de luz en todas direcciones, pero no somos conscientes de ellos a menos que entren en nuestra pupila. Los rayos de luz existen siempre independientemente de si los estamos mirando.

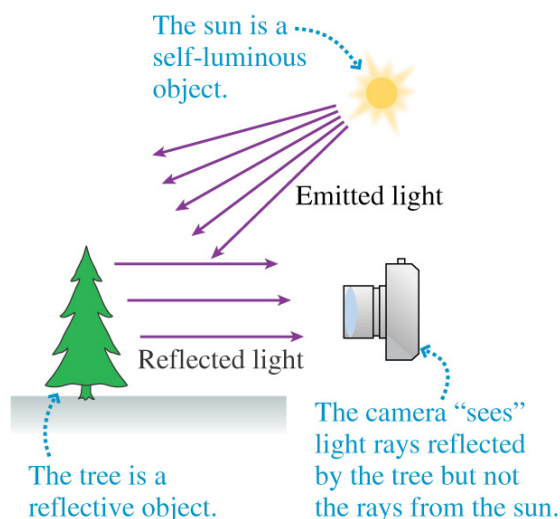
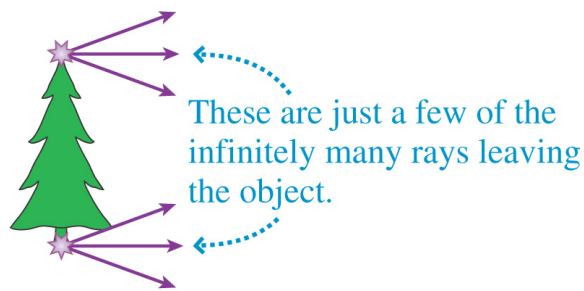
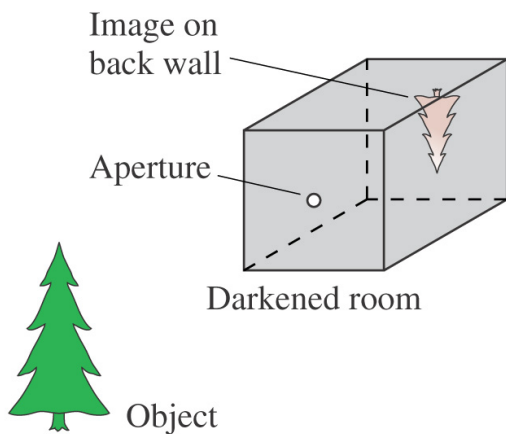


Diagrama de rayos: Los rayos se originan desde cada punto sobre un objeto y viajan hacia fuera en todas direcciones. Para simplificar usamos un diagrama de rayos que demuestra sólo unos pocos.

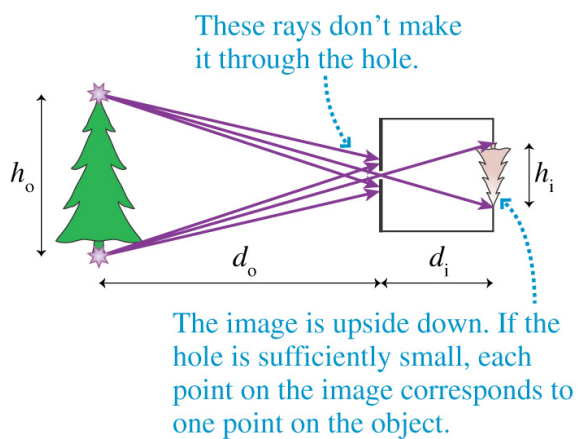
El diagrama de rayos es la representación pictórica que usaremos.



Aberturas: Una forma popular de entretenimiento en la antigua Roma es visitar la cámara oscura (habitación oscura), que es una habitación con un único agujero pequeño. Después de que los ojos se adaptan a la oscuridad los visitantes pueden ver imágenes en color del mundo exterior, aunque la imagen se ve invertida.



Un agujero a través del que pasa la luz se llama abertura. La geometría de los rayos es la causa de que la imagen se vea invertida.



Un aspecto interesante de la cámara oscura es que el tamaño de la imagen no es el mismo que el del objeto. Se define la magnificación (engrandecimiento) m como la relación entre la altura de la imagen h_{imagen} a la altura del objeto h_{objeto} :

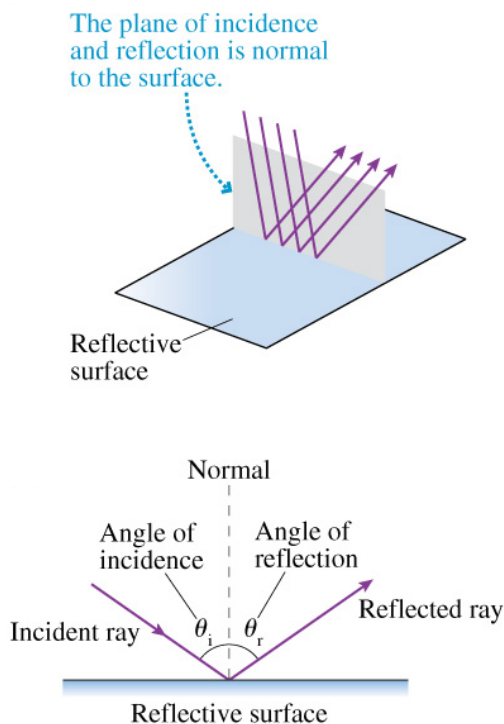
$$m = \frac{h_{\text{imagen}}}{h_{\text{objeto}}} = \frac{d_{\text{imagen}}}{d_{\text{objeto}}}$$

Una cámara oscura tiene $m < 1$

6.3.1 Reflexión

La reflexión es un fenómeno muy familiar en los espejos. Una percepción tridimensional nos demuestra la relación entre los rayos de luz y la superficie:

- El plano de la página es el plano de incidencia y reflexión. La superficie reflectante se extiende hacia dentro y hacia fuera de la página.
- Un único rayo de luz representa el paquete entero de rayos paralelos. Esto es una sobre simplificación pero el análisis es más claro.

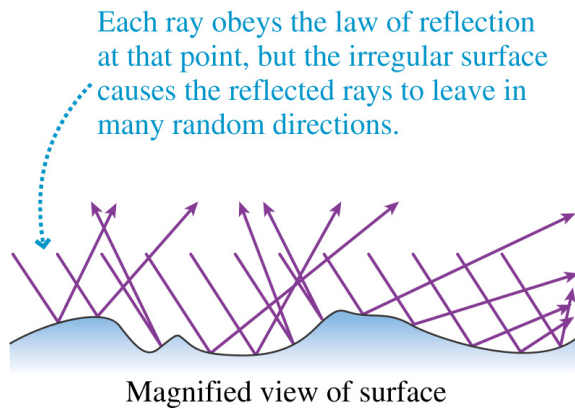


El ángulo θ_i entre el rayo y una línea perpendicular a la superficie (la normal a la superficie) se llama ángulo de incidencia. De la misma forma, el ángulo de reflexión θ_r es el ángulo entre el rayo reflejado y la normal a la superficie. La ley de reflexión establece:

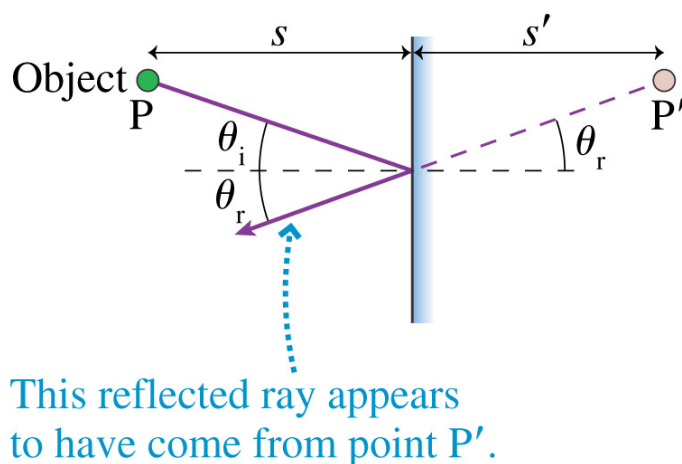
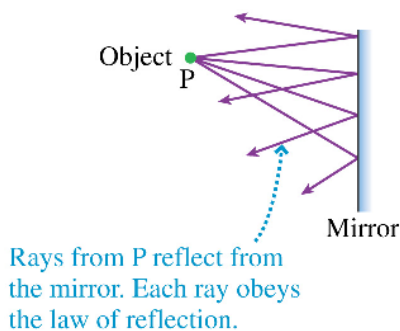
- 1.- El rayo incidente y el rayo reflejado están en el mismo plano normal a la superficie.
- 2.- El ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia: $\theta_r = \theta_i$.

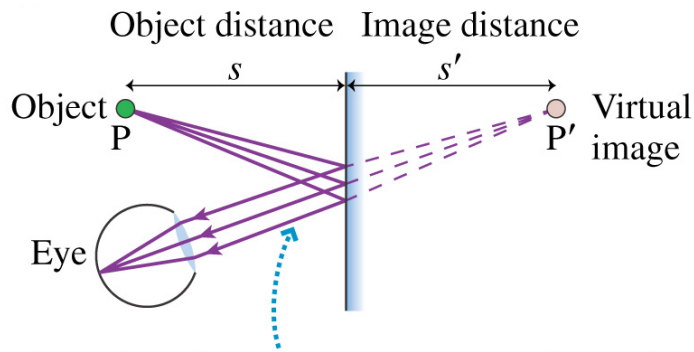
Es importante destacar que en los cálculos siempre se usa el ángulo medido desde la normal y no el ángulo entre el rayo y la superficie.

Reflexión difusa: Muchos objetos se ven por la luz que reflejan. Para una superficie rugosa la ley de la reflexión $\theta_r = \theta_i$ se cumple en cada punto pero las irregularidades de la superficie hace que los rayos reflejados salgan en muchas direcciones. Esta situación se llama reflexión difusa.



El espejo plano: Una de las aplicaciones más corrientes es que podemos vernos en un espejo. En la figura se observan los rayos procedentes de una fuente P, el rayo reflejado viaja a lo largo de una línea que pasa a través de un punto P' sobre la parte posterior del espejo. Como $\theta_r = \theta_i$ se observa que el punto P' está a la misma distancia detrás del espejo como P en la parte frontal del espejo ($s' = s$).

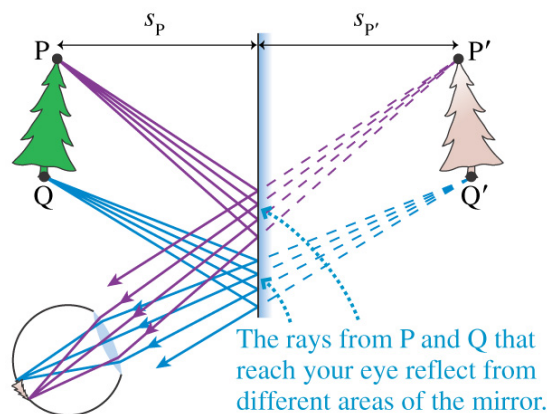




The reflected rays *all* diverge from P' , which appears to be the source of the reflected rays. Your eye collects the bundle of diverging rays and “sees” the light coming from P' .

La localización del punto P' es independiente del valor de θ_i . Por lo que todos los rayos reflejados viajan a lo largo de líneas que pasan a través del mismo punto P' . Los rayos de luz originales divergen desde el punto P , pero los rayos reflejados divergen desde P' . Por tanto, **todos los rayos reflejados aparecen como si vinieran desde el punto P'** . Para un espejo plano la distancia s' al punto P' es igual a la distancia del objeto s .

Si los rayos divergen desde el punto P de un objeto y llegan a un espejo los rayos reflejados divergen desde un punto P' y aparecen como que vienen de P' , por lo que llamamos a P' una imagen virtual del punto P . La imagen es virtual en el sentido de que en realidad no salen rayos de P' . Nuestro ojo ve los rayos como procedentes de P' .

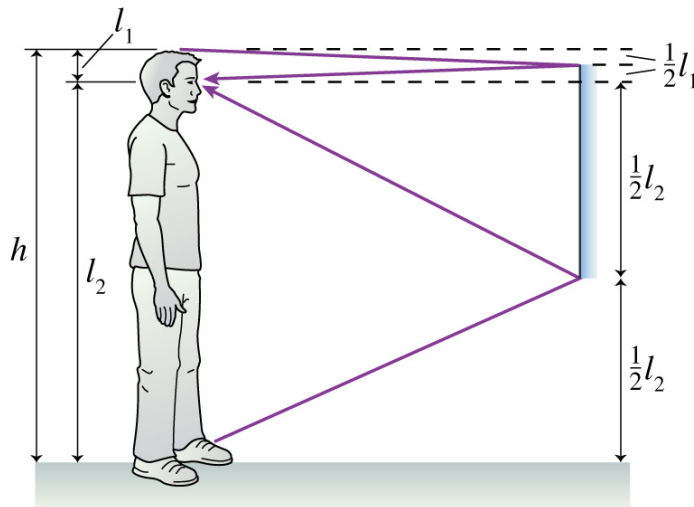


Your eye intercepts only a very small fraction of all the reflected rays.

Para un objeto cada punto sobre el mismo desde el que salen rayos tiene una imagen a igual distancia sobre la parte opuesta del espejo. El ojo captura y focaliza el paquete divergente de rayos desde cada punto de la imagen con el fin de ver la imagen total en el espejo. Dos hechos hay que considerar:

1. Los rayos desde cada punto de un objeto se desparan en todas direcciones y golpean cada punto sobre el espejo. Solamente unos pocos de estos rayos entran en el ojo y los otros rayos son reales y pueden ser vistos por otros observadores.

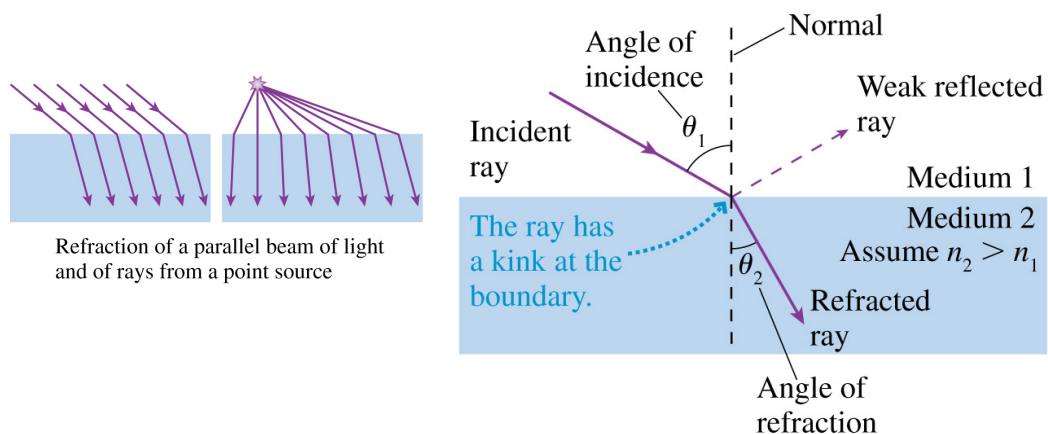
- Los rayos desde P y Q entran en el ojo después de reflejarse desde diferentes zonas del espejo. Esto es así porque no se puede ver la imagen completa de un objeto en un espejo muy pequeño.

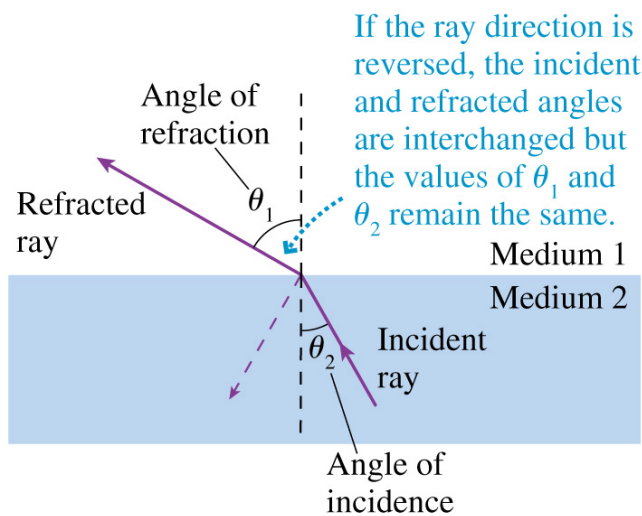


6.3.2 Refracción

Desde la antigüedad es conocido que ocurren dos fenómenos cuando un rayo de luz incide sobre una superficie lisa que separa dos materiales transparentes, tal como entre aire y vidrio:

- Parte de la luz se refleja desde la superficie, obedeciendo la ley de la reflexión.
- Parte de la luz continúa hacia el segundo medio. La luz es transmitida en lugar de reflejarse, pero los rayos de luz transmitidos cambian la dirección cuando cruzan la superficie. La transmisión de luz desde un medio a otro, pero con un cambio de dirección, se llama **refracción**.





La refracción de un rayo de luz en la superficie entre un medio 1 y otro medio 2. En el medio 1 sea θ_1 el ángulo entre el rayo y la normal y en el medio 2 sea θ_2 el ángulo entre el rayo y la normal. Para el medio en el que el rayo se aproxima a la superficie es el ángulo de incidencia. El ángulo sobre el lado transmitido medido desde la normal se llama ángulo de refracción.

La relación entre los ángulos θ_1 y θ_2 fue descubierta en 1621 por el holandés Snell, aunque algunos historiadores de la ciencia que era conocida con anterioridad. Pero el hecho es que se conoce como ley de Snell la ley de la refracción. Si un rayo refracta entre un medio 1 y un medio 2, teniendo índices de refracción n_1 y n_2 , el rayo con ángulos θ_1 y θ_2 en los dos medios se relacionan por la ley de Snell:

$$n_1 \sen \theta_1 = n_2 \sen \theta_2$$

En la ley no se menciona el ángulo incidente y el refractado.

El índice de refracción

Para Snell y sus contemporáneos n era simplemente un "índice del poder de refracción" de una sustancia transparente. La relación entre el índice de refracción y la velocidad de la luz no fue reconocida hasta el desarrollo de la teoría ondulatoria de la luz en el siglo XIX. La teoría predice, y los experimentos lo confirman, que la luz viaja a través de un medio transparente (agua o vidrio) a una velocidad menor que su velocidad c en el vacío. Definimos el índice de refracción n de un medio transparente como:

$$n = \frac{c}{v_{\text{medio}}}$$

Donde v_{medio} es la velocidad de la luz en el medio. Esto implica que $v_{\text{medio}} = c/n$. El índice de refracción de un medio es siempre $n > 1$ excepto para el vacío en el que $n = 1$ exactamente.

La ley de Snell se puede aceptar como un descubrimiento empírico acerca del comportamiento de la luz. De forma alternativa se puede usar el modelo ondulatorio para justificarlo. Así en la figura se observa un frente de onda en un tiempo t de una onda plana aproximándose a una superficie con una velocidad $v_1 = c/n_1$. Los rayos de luz son perpendiculares al frente de onda por lo que el ángulo incidente θ_1 es también el ángulo entre el frente de onda y la superficie.

Por el principio de Huygens sabemos que podemos localizar el frente de onda en un tiempo posterior por considerar que cada punto sobre el frente de onda es una fuente de nuevas ondas esféricas. Una onda esférica nueva desde el punto B viaja una distancia $v_1 \cdot \Delta t$ durante el intervalo de tiempo. Como el punto A ya ha alcanzado la superficie su nueva onda viaja a través del medio 2 a una velocidad $v_2 = c/n_2$. Esta nueva onda viaja la distancia $v_2 \cdot \Delta t$ durante el mismo tiempo.

El frente de onda al tiempo $t + \Delta t$ es tangente a las nuevas ondas. Se puede ver que se ha generado un nuevo pliegue debido al cambio en la velocidad de la onda. Los rayos en el medio 2 son todavía perpendiculares al frente de onda pero ahora viajan en el ángulo refractado θ_2 . Vemos ahora que los dos triángulos AB'B y

AB'A' comparten la hipotenusa AB'. Calculando la longitud de la hipotenusa para los dos triángulos se puede obtener la ley de Snell:

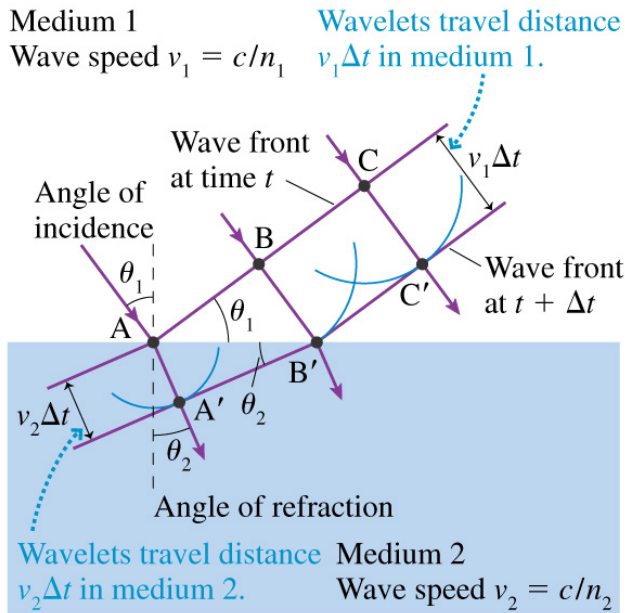
$$\left\{ \begin{aligned} \text{sen } \theta_1 &= \frac{BB'}{AB'} = \frac{v_1 \cdot \Delta t}{AB'} \end{aligned} \right\} \left\{ \begin{aligned} \text{sen } \theta_2 &= \frac{AA''}{AB'} = \frac{v_2 \cdot \Delta t}{AB'} \end{aligned} \right\} \Rightarrow AB' = \frac{v_1 \cdot \Delta t}{\text{sen } \theta_1} = \frac{v_2 \cdot \Delta t}{\text{sen } \theta_2}$$

$$\frac{v_1}{\text{sen } \theta_1} = \frac{v_2}{\text{sen } \theta_2} \Rightarrow \frac{\text{sen } \theta_1}{v_1} = \frac{\text{sen } \theta_2}{v_2} \Rightarrow \frac{c}{v_1} \text{sen } \theta_1 = \frac{c}{v_2} \text{sen } \theta_2 \Rightarrow n_1 \text{sen } \theta_1 = n_2 \text{sen } \theta_2$$

Ejemplos: Determina el índice de refracción de un medio 2 si sabemos que la luz en el citado medio llega a la superficie de separación con el medio 1 formando un ángulo $\theta_2 = 30^\circ$ con la normal y sale al medio 1 de índice de refracción $n_1 = 1,0$ con un ángulo $\theta_1 = 53^\circ$.

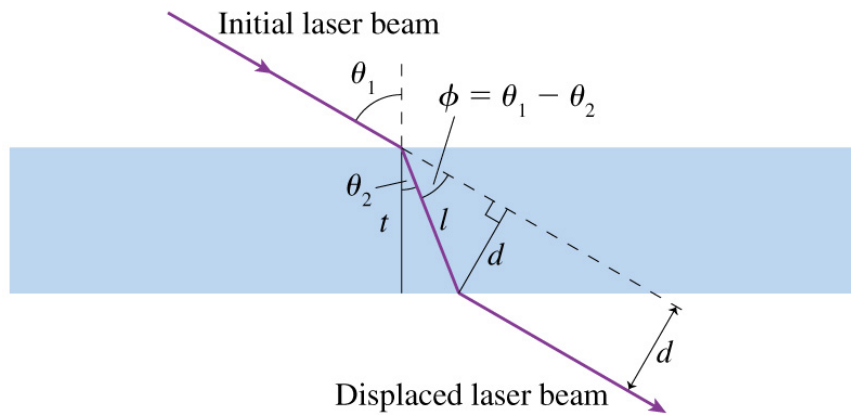
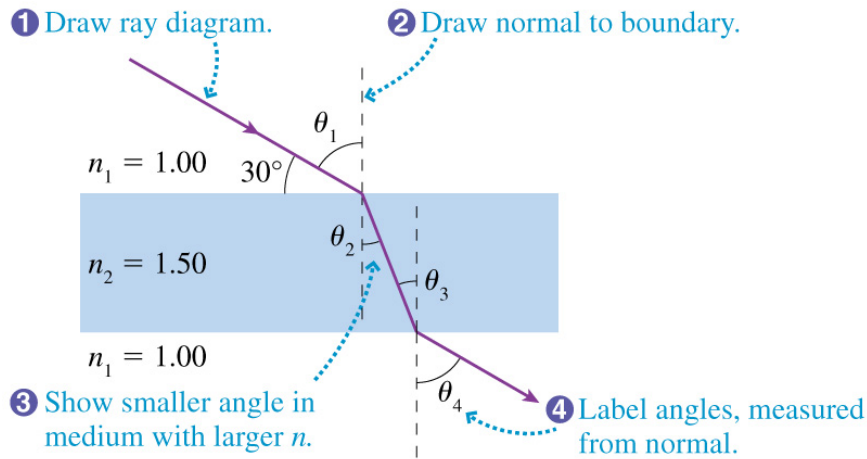
Solución:

$$n_1 \text{sen } \theta_1 = n_2 \text{sen } \theta_2 \Rightarrow n_2 = \frac{1,0 \times \text{sen } 53^\circ}{\text{sen } 30^\circ} = 1,597$$



Ejemplos de refracción:

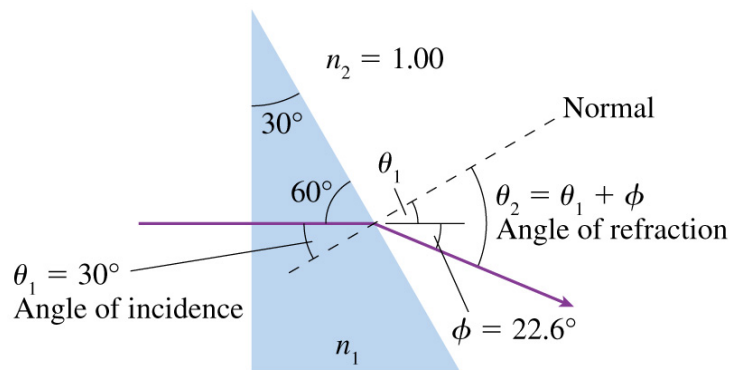
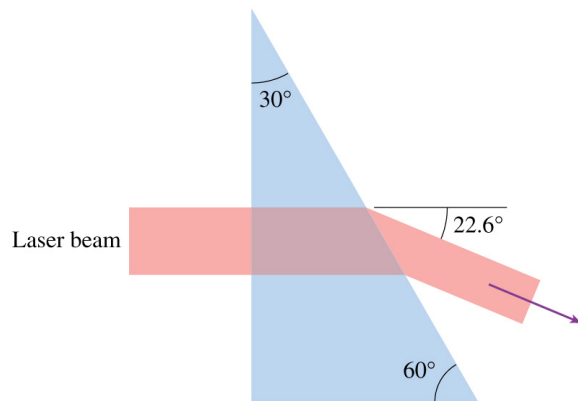
Desviando un rayo láser



Medida de índice de refracción

Un rayo de luz incide perpendicularmente a la cara frontal de un prisma ($\theta_{\text{incidente}} = 0^\circ$), y así es transmitido al interior del prisma a través de la superficie sin ser desviado. En la segunda superficie interior del prisma la luz incide con un ángulo de 30° respecto de la normal y sale del prisma a $52,6^\circ$ respecto de la normal. Por lo que el rayo de luz se ha desviado $\phi = \theta_2 - \theta_1 = 52,6^\circ - 30^\circ = 22,6^\circ$ de su trayectoria inicial. Siendo el índice de refracción del prisma 1,59:

$$n_1 = (n_2 \cdot \text{sen}\theta_2) / \text{sen}\theta_1 = (1,00 \cdot \text{sen}52,6^\circ) / \text{sen}30^\circ = 1,59$$



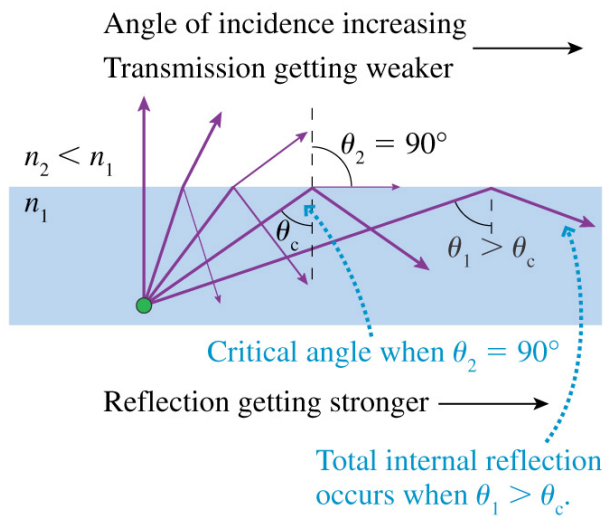
θ_1 and θ_2 are measured from the normal.

Reflexión interna total:

Vamos a considerar que la luz en un medio 2, de índice refracción $n_2 = 1,597$, llega a la superficie de separación con el medio 1 ($n_1 = 1,0$) formando un ángulo $\theta_2 = 45^\circ$ y queremos determinar el ángulo θ_1 con el que sale al medio 1.

$$n_1 \sen \theta_1 = n_2 \sen \theta_2 \Rightarrow \sen \theta_1 = \frac{n_2 \sen \theta_2}{n_1} = \frac{1,597 \times \sen 45^\circ}{1,00} = 1,129$$

El ángulo θ_1 no se puede calcular por ser su seno mayor que uno. Por lo que el rayo no puede refractar en la superficie. Así el 100% de la luz se refleja desde la superficie y vuelve al medio 2. Este proceso se llama reflexión interna total.



Un ángulo crítico θ_c es el que produce un ángulo refractado de 90° :

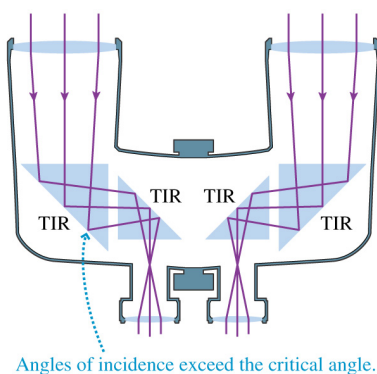
$$n_1 \sin \theta_{\text{crítico}} = n_2 \sin 90^\circ \Rightarrow \sin \theta_c = \frac{n_2 \sin 90^\circ}{n_1} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \theta_c = \arcsen \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

La luz refractada desaparece cuando el ángulo es el crítico y la reflexión será un 100% para cualquier ángulo incidente $\theta_1 \geq \theta_c$. El ángulo crítico se cumple si $n_2 < n_1$. No hay ángulo crítico y no hay reflexión interna total si $n_2 > n_1$.

Como ejemplo, el ángulo crítico dentro de un trozo de vidrio en la superficie vidrio-aire es:

$$n_{1(\text{vidrio})} \sin \theta_{c(\text{vidrio})} = n_{2(\text{aire})} \sin 90^\circ \Rightarrow \theta_{c(\text{vidrio})} = \arcsen \left(\frac{n_{2(\text{aire})}}{n_{1(\text{vidrio})}} \right) = \arcsen \left(\frac{1,00}{1,50} \right) = 42^\circ$$

El hecho de que el ángulo crítico sea inferior a 45° tiene importantes aplicaciones. Por ejemplo, los binoculares. Las lentes para ver a distancia son mejores que los ojos, por lo que los rayos de luz necesitan unirse antes de salir por los oculares. En vez de usar espejos, que se ensucian y rompen fácilmente y requieren alinearse, el binocular utiliza un par de prismas en cada lado. Así la luz experimenta dos reflexiones internas totales y sale desde el ocular.



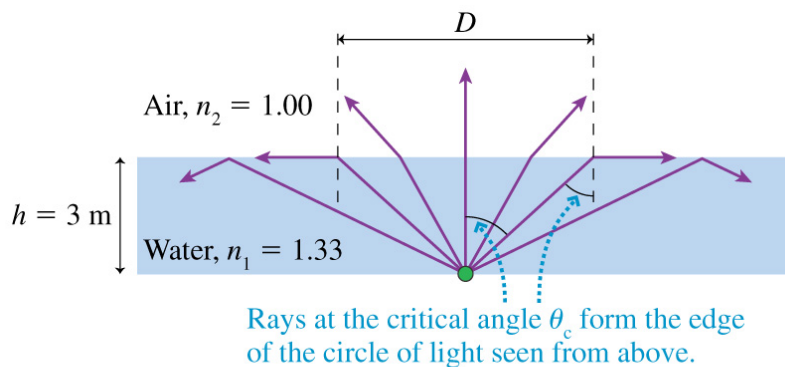
Ejemplo de reflexión interna total

Una bombilla está dentro de una piscina a 3 m de profundidad. ¿Cuál es el diámetro del círculo de luz visto sobre la superficie del agua desde arriba?

La bombilla emite rayos en todos los ángulos pero solamente algunos rayos refractan para entrar en el aire donde pueden ser vistos desde arriba. Los rayos que llegan a la superficie a un ángulo mayor que el ángulo crítico experimentan una refracción interna total y permanecen dentro del agua. El diámetro del círculo de luz es la distancia entre los dos puntos en los que los rayos tocan la superficie en el ángulo crítico.

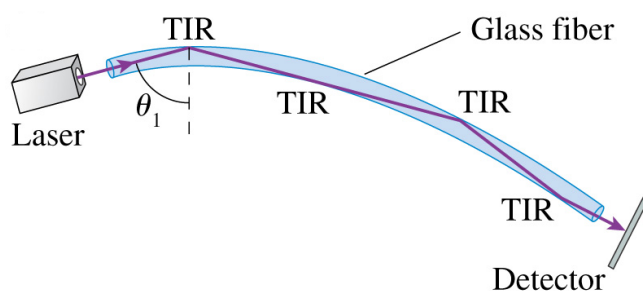
Aplicando la trigonometría el diámetro del círculo es: $\tan\theta_c = \frac{1}{2}D/h$; $D = 2 \cdot h \cdot \tan\theta_c$

El ángulo crítico es: $n_1 \cdot \sin\theta_c = n_2 \cdot \sin 90^\circ$; $\theta_c = \arcsin(1,00/1,33) = 48,7^\circ$; $D = 6,83 \text{ m}$



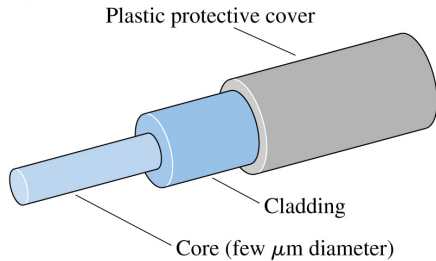
Fibra óptica

La aplicación más moderna de la reflexión interna total es la transmisión de luz a través de la fibra óptica.



Un rayo láser entra en el extremo de un largo pero estrecho tubo de vidrio. Los rayos de luz pasan fácilmente desde el aire al vidrio pero ellos chocan por dentro con las paredes del tubo de vidrio con un ángulo de incidencia próximo a 90° . Esto está por encima del ángulo crítico y el chorro de láser experimenta una reflexión interna total y permanece dentro del vidrio. El chorro de láser continúa rebotando a lo largo del tubo como si la luz estuviera dentro de una tubería. Es por lo que la fibra óptica se suele llamar tuberías de luz. Al final del tubo los rayos se refractan fuera sin dificultad y pueden ser detectados.

Aunque un sencillo tubo de vidrio puede transmitir la luz estando la superficie externa rodeada por aire, tiene el problema comercial de que se puede romper. Para ello el tubo de vidrio se recubre de capas de un material con un índice de refracción menor que el del centro que es de vidrio. La superficie no queda expuesta al medio externo que puede estar en condiciones adversas.

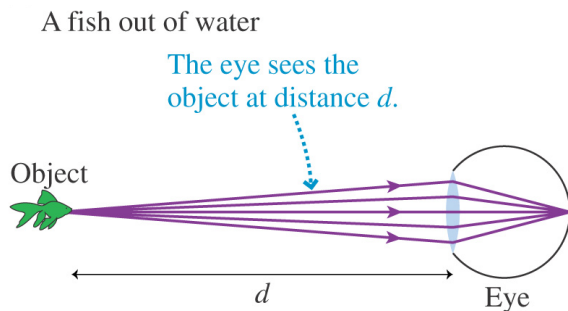


Aunque el vidrio sea de alta pureza no es totalmente transparente, y en pequeña cantidad absorbe la intensidad de la luz. El vidrio que se usa en las fibras ópticas tiene una mínima absorción en la longitud de onda de $1,3 \mu\text{m}$, en el infrarrojo y la luz puede viajar cientos de kilómetros sin costo.

6.3.3 Formación de imágenes por refracción

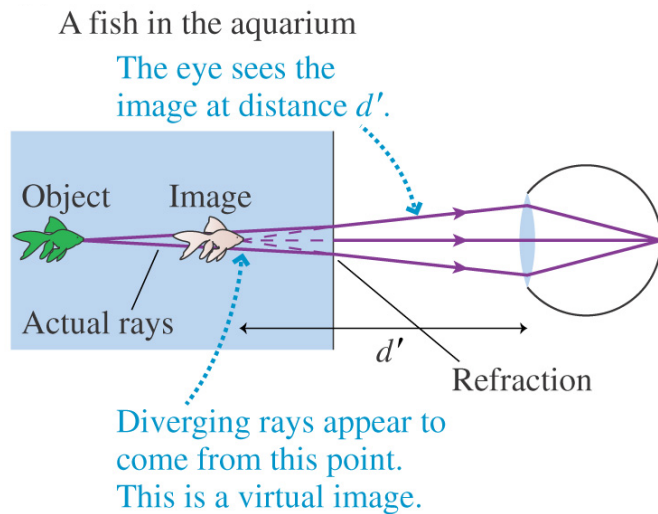
Cuando miramos los peces de un acuario vemos que uno de ellos parece estar próximo a la ventana del acuario. Pero si lo observamos desde dentro del acuario nos sorprendemos porque el pez está más alejado de la ventana de lo que creíamos.

Vemos un objeto porque salen de él un paquete de rayos que entran en la pupila del ojo y se focaliza sobre la retina. Y el cerebro determina la distancia d del objeto desde el ojo.



Ahora colocamos un pez en la parte interior de un acuario a una distancia d del ojo. Los rayos de luz que salen del pez se refractan en la superficie agua-aire. Como los rayos de luz proceden del medio agua y van al aire, pasan de un medio con índice de refracción mayor a otro medio con índice de refracción menor, luego se refractan distanciándose de la normal (aumentando el ángulo).

Por lo que el paquete de rayos que entran en el ojo parecen divergir desde un punto más próximo a una distancia d' . **El objeto parece estar más próximo de lo que realmente está debido a la refracción de la luz en la superficie de separación de los dos medios.**



Ya vimos que los rayos reflejados desde un espejo divergen desde un punto que no es el punto objeto. Llamamos aquel punto la **imagen virtual**. De la misma forma, si los rayos desde un objeto P se refractan en una superficie entre dos medios de tal forma que los rayos divergen desde un punto P' y parece que vienen de P', llamamos P' una imagen virtual del punto P. La imagen virtual del pez es la que nosotros vemos.

Consideramos una línea perpendicular a la superficie llamada **eje óptico**. Sea un rayo que sale del objeto formando un ángulo θ_1 respecto al eje óptico, siendo el mismo ángulo de incidencia en la superficie de separación de los dos medios, donde el rayo se refracta en el segundo medio un ángulo θ_2 . Trazando el rayo refractado hacia atrás podemos ver que θ_2 es el mismo ángulo entre el rayo refractado y el eje óptico en el punto P'.

La distancia l es común a los dos rayos, incidente y refractado, siendo

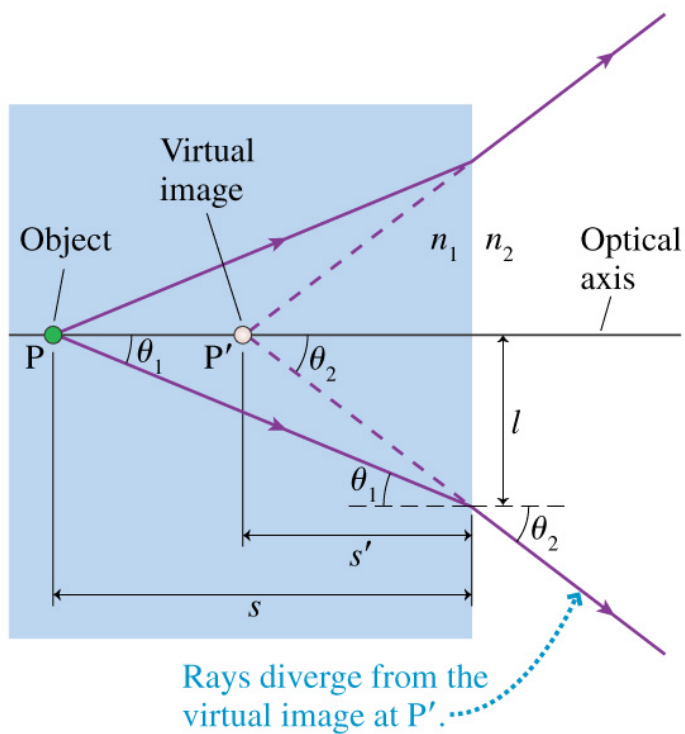
$$l = s \cdot \tan \theta_1 = s' \cdot \tan \theta_2 \quad \Rightarrow \quad s' = \frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} s$$

En la práctica el ángulo entre cualquiera de estos rayos y el eje óptico es muy pequeño porque el tamaño de la pupila del ojo es mucho menor que la distancia entre el objeto y su ojo. Los rayos que son casi paralelos al eje se llaman rayos paraxiales. Para pequeños ángulos se puede considerar que el ángulo es igual a su seno y a su tangente. Por ello

$$\left\{ s' = \frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} s \right\} \left\{ \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \right\}$$

$$\frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} \approx \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad \Rightarrow \quad s' = \frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} s = \frac{n_2}{n_1} s$$

El hecho de que s' es independiente de θ_1 implica que todos los rayos paraxiales parecen venir todos del mismo punto P'.



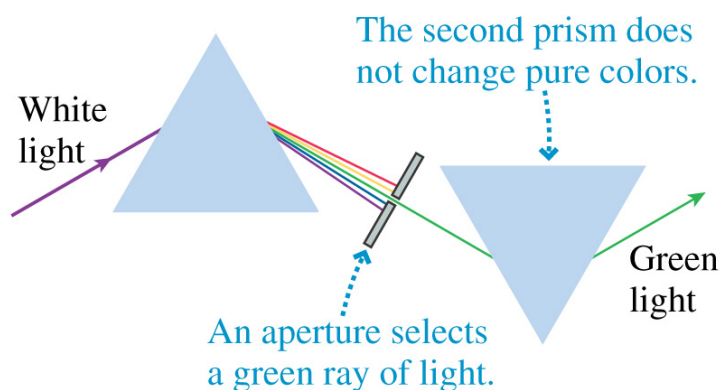
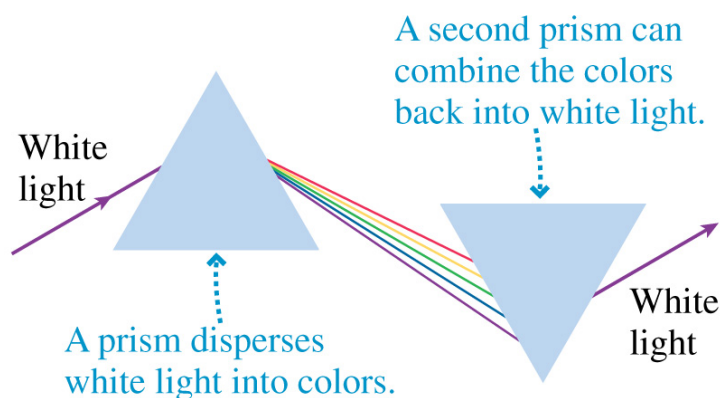
6.3.4 Color y dispersión

Uno de los aspectos visuales de la luz es el color, pero el color no es una magnitud física sino una percepción. El color está asociado con la longitud de onda de la luz, así el color rojo tiene una longitud de onda de 650 nm.

Mucho de los resultados de la óptica no dependen del color. Los rayos de luz roja pasan a través del vidrio lo mismo que los rayos de luz azul, por lo que no necesitamos conocer el color de la luz (o más precisamente su longitud de onda) para usar las leyes de la reflexión y refracción.

Color

Es conocido desde la antigüedad que las formas irregulares del vidrio y los cristales causan que la luz del sol se rompa en varios colores. Una idea común fue que el vidrio o el cristal de alguna manera alteran las propiedades de la luz añadiéndole color a la luz. Newton sugirió una explicación diferente. Lo que hizo fue pasar un rayo de sol por un prisma produciendo el familiar arco iris de la luz. Sabemos que el prisma dispersa la luz, es decir, la separa en sus componentes. La idea novedosa de Newton llevó a usar un segundo prisma, invertido con respecto al primero, para volver a juntar los colores. Encontró que la luz sale del segundo prisma como un rayo puro de luz blanca.



Pero el rayo de luz sale blanca si todos los rayos pasan entre los dos prismas. Si se bloquea alguno de los rayos, que van entre un prisma y otro, la luz que sale es de color. Esto nos indica que el color está asociado con la propia luz, no con el prisma. Newton verificó esta idea colocando una pequeña abertura entre los prismas para que pasen solamente los rayos de un color determinado (verde). Si el prisma altera las propiedades de la luz entonces el segundo prisma cambiará la luz verde a otros colores. Sin embargo, la luz sale del segundo prisma sin cambiar la luz verde que entra en el prisma.

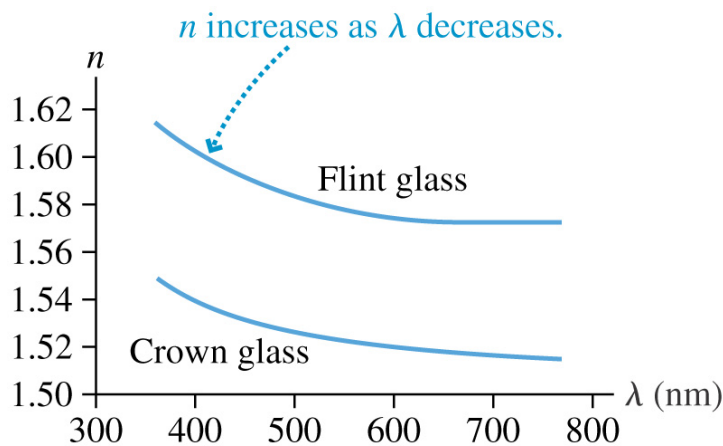
Estos y experimentos similares demuestran:

1. Lo que percibimos como luz blanca es una mezcla de todos los colores. La luz blanca se puede dispersar en sus diferentes colores y, igualmente importante, la mezcla de todos los colores produce luz blanca.
2. El índice de refracción de un material transparente difiere ligeramente para diferentes colores de luz. El vidrio tiene un índice de refracción ligeramente mayor para la luz violeta que para la luz verde o la luz roja. Es por lo que los diferentes colores de luz refractan ligeramente en ángulos diferentes y siguen ligeramente diferentes caminos a través de un trozo de vidrio. Un prisma no altera la luz o no le añade nada, el prisma simplemente hace que diferentes colores que están unidos en luz blanca sigan ligeramente diferentes trayectorias.

Dispersión

Thomas Young con su experimento de la interferencia de doble rendija, demostró que la luz que nosotros percibimos como diferentes colores está asociada con la luz de diferentes longitudes de onda. Las mayores longitudes de onda son percibidas como luz roja y las de menor longitud de onda como luz violeta. El espectro de luz visible va desde el rojo (650 nm) hasta el azul (450 nm).

Newton observó que el índice de refracción varía ligeramente con el color lo que implica que el índice de refracción varía ligeramente con la longitud de onda. Esto se conoce como **dispersión**. En la figura se observa que las curvas de dispersión de dos vidrios **n es mayor cuando la longitud de onda es más corta**, así la luz ultravioleta refracta más que la luz roja.



Ejemplo de la dispersión de la luz con un prisma:

Un rayo de luz incide perpendicularmente a la cara frontal de un prisma ($\theta_{\text{incidente}} = 0^\circ$), y así es transmitido al interior del prisma a través de la superficie sin ser desviado. En la segunda superficie interior del prisma la luz incide con un ángulo de 30° respecto de la normal y sale del prisma a $52,6^\circ$ respecto de la normal. Por lo que el rayo de luz se ha desviado $\phi = \theta_2 - \theta_1 = 52,6^\circ - 30^\circ = 22,6^\circ$ de su trayectoria inicial. Siendo el índice de refracción del prisma 1,59:

$$n_1 = (n_2 \cdot \text{sen}\theta_2) / \text{sen}\theta_1 = (1,00 \cdot \text{sen}52,6^\circ) / \text{sen}30^\circ = 1,59$$

Suponemos que este es el índice de refracción para la luz violeta pero que la luz roja tiene un índice de refracción de 1,54. Determina el ángulo que se desvía de su trayectoria, por el prisma, la luz roja:

$$\theta_2 = \arcsen(n_1 \cdot \text{sen}\theta_1 / n_2) = \arcsen(1,54 \cdot \text{sen}30^\circ / 1,00) = 50,4^\circ$$

El rayo de luz rojo se desvía: $\phi_{\text{rojo}} = \theta_2 - \theta_1 = 50,4^\circ - 30^\circ = 20,4^\circ$

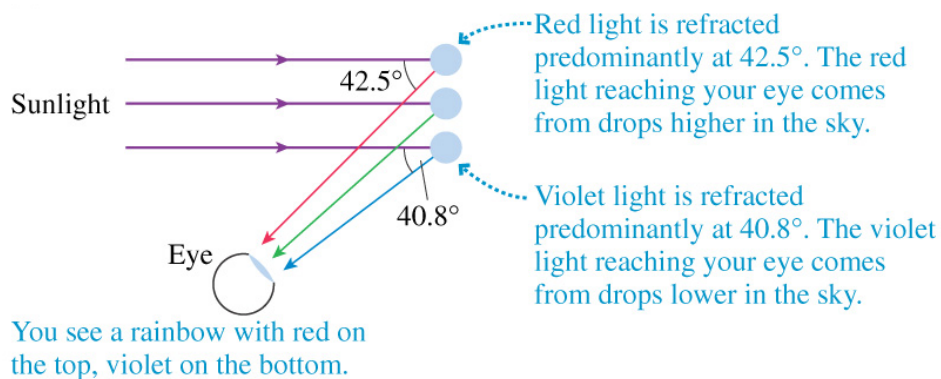
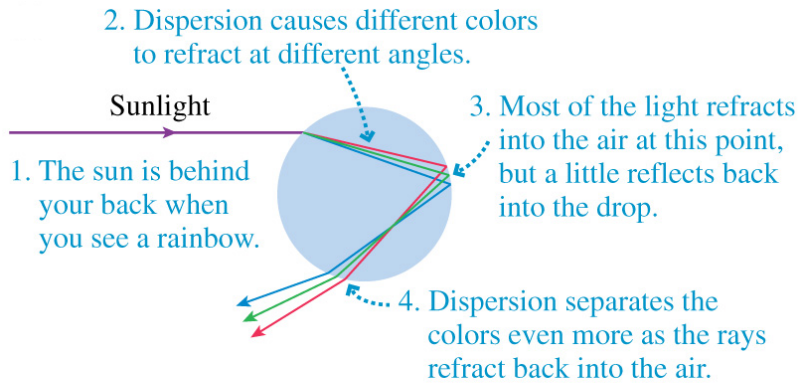
Por tanto, la luz violeta se desvía $22,6^\circ$ de su trayectoria y la luz roja $20,4^\circ$. La diferencia es de $2,2^\circ$. Si queremos ver la separación a 2 m de distancia sería un arco = ángulo · radio:

$$s = \Delta\phi \cdot r = 2,2^\circ \times \frac{2\pi \text{ rad}}{360^\circ} \times 2 \text{ m} = 0,0384 \text{ rad} \times 2 \text{ m} = 0,0768 \text{ m}$$

El ángulo es tan pequeño que a 2 m los rayos se separan 7,68 cm.

El arco iris

Una de las fuentes de color más interesantes en la naturaleza es el arco iris. La causa básica del arco iris es una combinación de refracción, reflexión y dispersión.



En los gráficos se puede considerar que el borde superior del arco iris es violeta. Sin embargo, la parte superior es roja, y violeta la parte inferior. Los rayos que salen hacia abajo se desparraman separándose y no pueden alcanzar el ojo. Se observa que un rayo de luz roja cuando alcanza el ojo viene de una gota que está en el cielo más alta que la gota de la que procede el rayo de luz violeta. Es decir, que los colores que vemos en un arco iris refractando hacia nuestro ojo proceden desde diferentes gotas de agua, no de la misma gota. Hemos de mirar más alto en el cielo para ver la luz roja que para ver la luz violeta.

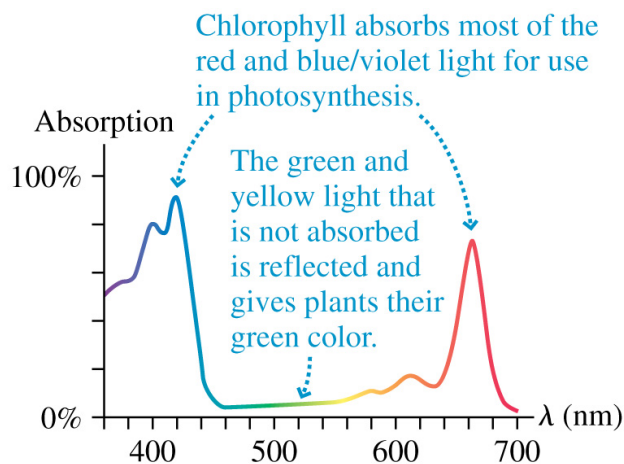
Filtros coloreados y objetos coloreados

La luz blanca que pasa a través de una pieza de vidrio verde sale como luz verde. Newton dijo que el vidrio verde quita la luz que no es verde. Es decir, un vidrio coloreado absorbe todas las longitudes de onda

excepto las del color, y ese color es transmitido sin obstáculo. Es como un filtro que quita todas las longitudes de onda menos la del propio color.

Este comportamiento es cierto para vidrios filtro, los cuales transmiten la luz, pero para pigmentos que absorben luz de alguna longitud de onda pero reflejan luz en otras longitudes de onda. Por ejemplo, pintura roja contiene pigmentos que reflejan luz en longitudes de onda próximas a 650 nm mientras absorben todas las demás. Los pigmentos en pinturas, tintas y objetos naturales de muchos de los colores que observamos en el mundo, desde el lápiz de labio rojo hasta el azul de las plumas de los pájaros.

Como ejemplo vemos en la curva de absorción de la clorofila, que es esencial para la fotosíntesis de las plantas verdes. Las reacciones químicas de la fotosíntesis pueden usar luz roja y luz azul-violeta, así la clorofila absorbe luz roja y luz azul-violeta desde la luz del sol. Pero la luz verde y la luz amarilla no son absorbidas. Dando lugar, para conservar la energía, que estas longitudes de onda son reflejadas dando al objeto un color verde-amarillo. Cuando miramos la luz verde que sale de un árbol estamos viendo la luz reflejada que no necesita para la fotosíntesis.



Dispersión de la luz: cielos azules y puestas de sol rojas

En el modelo de rayo hemos visto que dentro de un medio la luz puede ser dispersada o absorbida. Hemos visto también que la absorción de luz puede depender de la longitud de onda y puede crear colores en los objetos. ¿Cuáles son los efectos de la dispersión?

La luz puede dispersarse por pequeñas partículas que están suspendidas en el medio. Si las partículas son grandes comparadas con la longitud de onda de la luz (pueden ser microscópicas y no visibles al ojo) la luz esencialmente es reflejada por las partículas. La ley de la reflexión no depende de la longitud de onda por lo que todos los colores son dispersados igualmente. La luz blanca dispersada desde muchas partículas pequeñas hace que el medio aparezca nublado y blanco. Dos ejemplos bien conocidos son nubes, donde el tamaño micrométrico de las gotas de agua dispersa la luz, y la leche, que es una suspensión coloidal de gotas microscópicas de grasas y proteínas.

Un aspecto más interesante de la dispersión tiene lugar a nivel atómico. Los átomos y las moléculas de un medio transparente son mucho menores que la longitud de onda de la luz, por lo que ellos no pueden dispersar la luz por reflexión. En lugar de eso, el campo eléctrico oscilante de la onda de luz interactúa con los electrones en cada átomo de tal forma que la luz es dispersada. Esta dispersión a nivel atómico se llama dispersión Rayleigh.

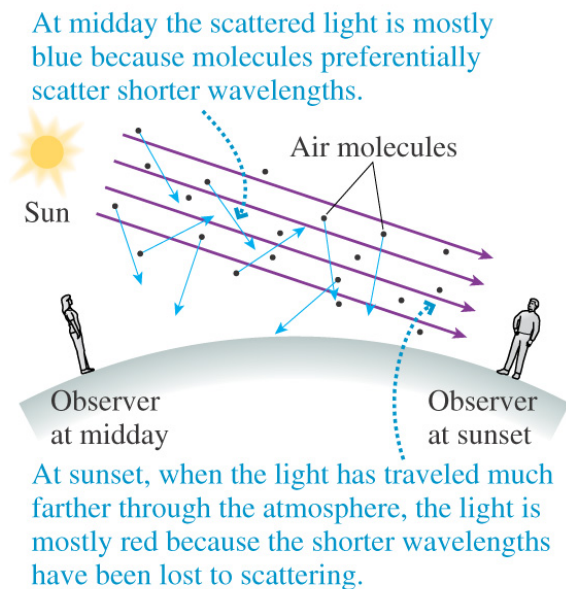
A diferencia de la dispersión de pequeñas partículas, la dispersión Rayleigh desde átomos y moléculas no depende de la longitud de onda. Un análisis detallado demuestra que la intensidad de la luz dispersada

depende inversamente de la cuarta potencia de la longitud de onda: $I_{\text{dispersada}} \propto \lambda^{-4}$. Esta dependencia de la longitud de onda explica por qué el cielo es azul y las puestas de sol rojas.

Como la luz del sol viaja a través de la atmósfera, la dependencia de la longitud de onda λ^{-4} para la dispersión Rayleigh causa que las longitudes de onda cortas sean preferentemente dispersadas. Si tomamos 650nm la luz roja y 450nm la luz azul, la intensidad de luz azul dispersada relativa a la luz roja es de 4: $I_{\text{azul}}/I_{\text{roja}} = (650/450)^4 = 4$.

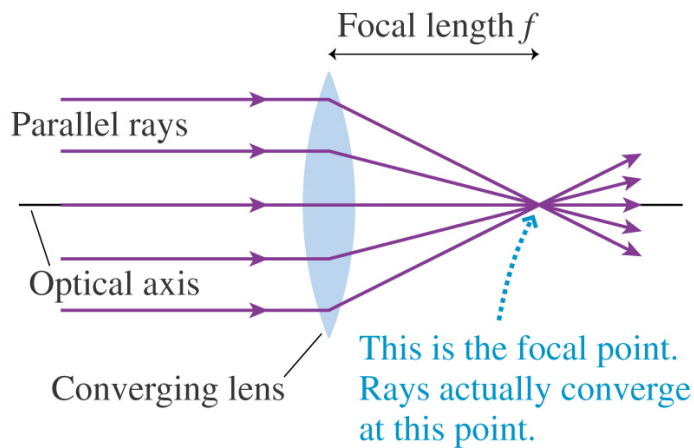
La luz azul es dispersada cuatro veces más que la luz roja y esto es lo que demuestra por qué el cielo es azul.

Debido a la curvatura de la Tierra la luz del Sol tiene que viajar más a través de la atmósfera cuando vemos atardecer que en las horas del mediodía. De hecho la longitud de camino a través de la atmósfera en el atardecer es tan largo que esencialmente todas las longitudes de onda cortas se han perdido debido a la dispersión Rayleigh. Solamente quedan las de longitud de onda mayores (naranja y rojo) y ellas hacen el color del atardecer.

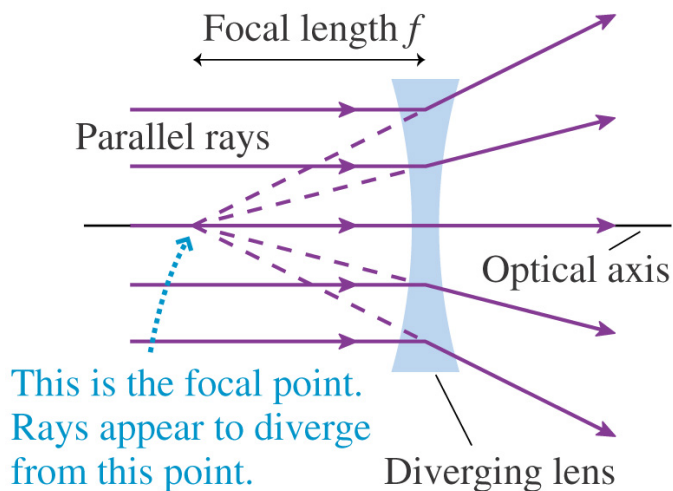


6.3.5 Lentes delgadas: trazado los rayos

Una cámara oscura o una cámara con una abertura del tamaño de una cabeza de alfiler forman imágenes sobre una pantalla, pero las imágenes son débiles y no perfectamente focalizadas o centradas. La capacidad de crear una imagen bien focalizada y con brillo mejora enormemente usando lentes. Una lente es un material transparente que usa la refracción en superficies curvadas para formar imágenes desde rayos de luz divergentes. Haremos un análisis detallado de la refracción de lentes. Primero estableceremos un método pictórico de comprensión de de formación de imágenes. Este método se llama **trazado de rayos**.



En la figura se observan rayos paralelos entrando en dos lentes diferentes. La **lente convergente** hace que los rayos refractados vayan hacia el eje óptico. El punto común a través del cual pasan los rayos, inicialmente paralelos, se llama **punto focal** de la lente. La distancia del punto focal desde la lente se llama **longitud focal f** de la lente. La **lente divergente** refracta los rayos paralelos lejos del eje óptico. Esta lente también tiene un punto focal. La longitud focal está relacionada con la curvatura y el índice de refracción de la lente. Siendo **la longitud focal la distancia desde la lente en la cual los rayos paralelos convergen en el eje óptico o desde el que ellos divergen**.



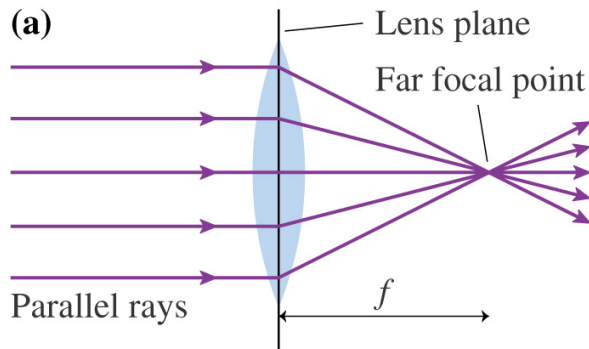
Lentes convergentes

Las observaciones básicas acerca de la lentes son suficientes para conocer la formación de imágenes por lentes delgadas.

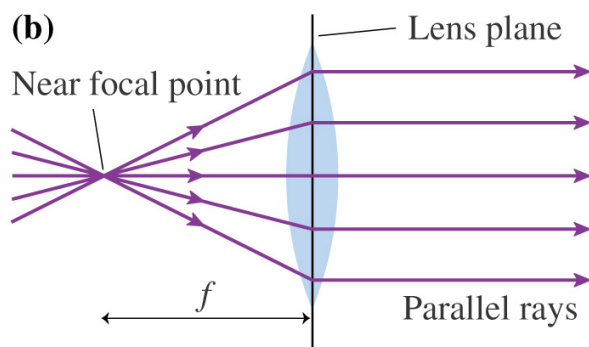
Una lente delgada es una lente cuyo espesor es muy pequeño en comparación a su longitud focal y en comparación a la distancia objeto e imagen. Haremos la aproximación de que el espesor de una lente delgada es cero y que la lente se encuentra en un plano llamado plano de la lente. Dentro de esta aproximación, toda la refracción tiene lugar cuando los rayos cruzan la lente plana, y todas las distancias se miden desde la lente plana. Esta aproximación es muy buena para muchas aplicaciones prácticas.

En las figuras se observan tres importantes situaciones de rayos de luz pasando a través de una delgada lente convergente.

Es significativo que la lente tiene dos puntos focales, localizados a distancia f sobre cada lado de la lente. El punto focal sobre el lado sobre el que se aproximan los rayos es el próximo y el otro el lejano.

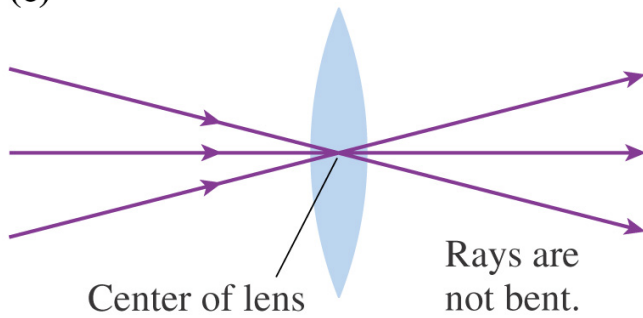


Any ray initially parallel to the optical axis will refract through the focal point on the far side of the lens.



Any ray passing through the near focal point emerges from the lens parallel to the optical axis.

(c)

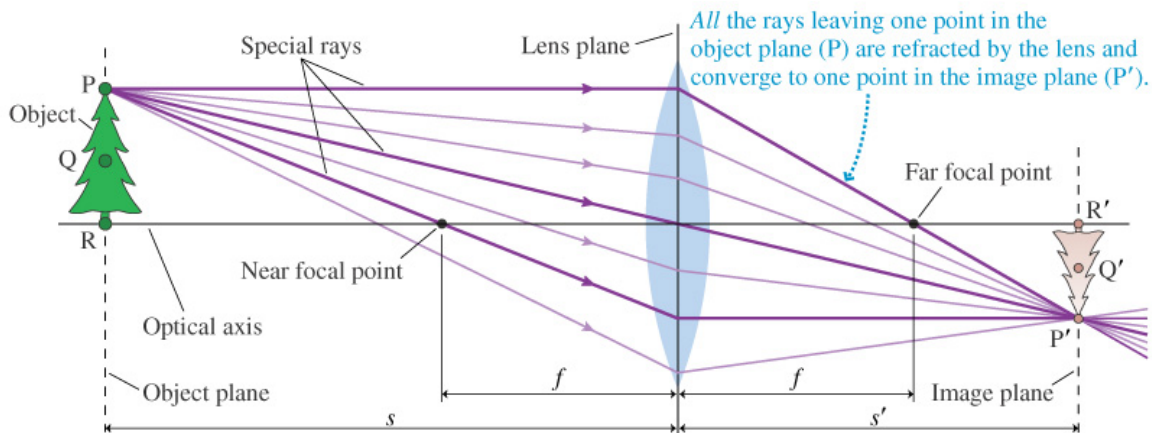


Any ray directed at the center of the lens passes through in a straight line.

Imágenes reales

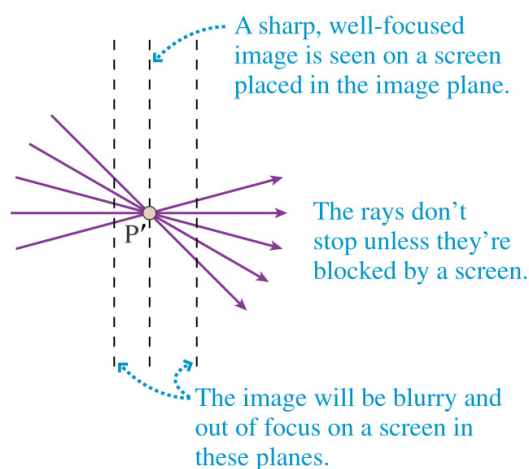
En la figura se observa un objeto y una lente, estando el objeto a una distancia mayor que la longitud focal. Los rayos desde el punto P sobre el objeto son refractados por la lente y convergen en P' sobre el lado opuesto de la lente. Llamamos P' una imagen real del punto P.

Todos los puntos del objeto que están en el mismo plano, el plano objeto, convergen a puntos imagen en el plano imagen. Los puntos Q y R en el plano del objeto tienen punto Q' y R' en el mismo plano como el punto P'.



Hay dos importantes observaciones. Primera la imagen está invertida respecto del objeto y se llama imagen invertida, que es una característica de la formación de una imagen real con una lente convergente. Segunda, los rayos desde el punto P llenan la superficie entera de la lente, y todas las zonas de la lente contribuyen a

la imagen. Una lente mayor cogerá más rayos y hará una imagen más brillante. Esta es una ventaja de una lente frente a una cámara oscura.



Trazado de rayos para una lente convergente:

1. Dibuja el eje óptico. Centra la lente sobre el eje. Representa el objeto con una flecha derecha a una distancia s . Coloca la base de la flecha sobre el eje.
2. Dibuja los **tres rayos especiales** desde la parte superior de la flecha. a) Un rayo paralelo al eje refracta hacia el punto focal del lado opuesto. b) Un rayo que entra en la lente a lo largo de la línea al punto focal próximo sale paralelo al eje. c) Un rayo a través del centro de la lente no se curva.
3. Extiende los rayos hasta converjir. Este es el punto imagen. Mide la distancia s' y la altura h' de la imagen.

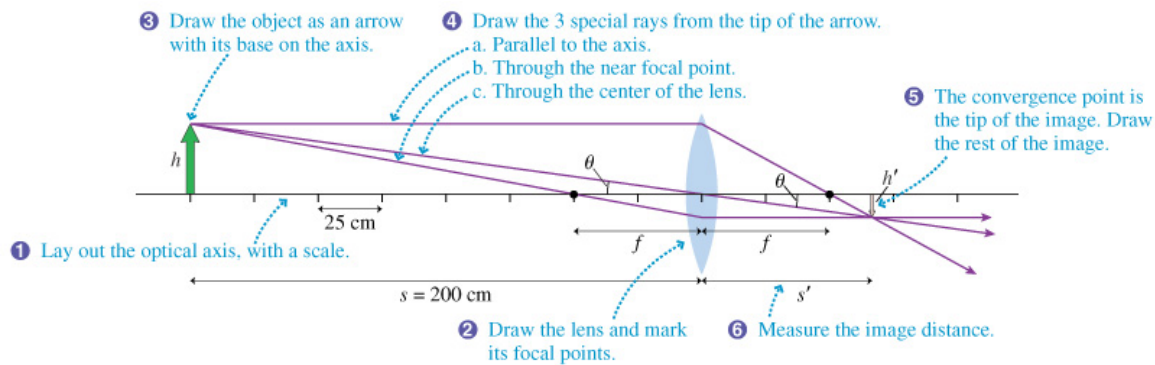
Ejemplo de trazo de la imagen de una flor

Una flor de 4 cm de diámetro está a 200 cm de una lente de una cámara que tiene 50 cm de longitud focal. Determina la distancia de la pantalla detrás de la lente para focalizar la imagen y cuál será el diámetro de la imagen.

El diagrama de rayos: la imagen se dibuja donde convergen los tres rayos especiales que son el rayo paralelo al eje que pasa luego por el foco, el rayo que pasa a través del punto focal próximo y el rayo que pasa a través del centro de la lente.

Se puede ver desde el dibujo que la distancia de la imagen es de $s' = 67$ cm. Esta es la posición para colocar la pantalla o película para focalizar la imagen mejor.

Las alturas: $h'/h = s'/s$; $h' = h \cdot s'/s = 4 \text{ cm} \cdot 67 \text{ cm} / 200 \text{ cm} = 1,3 \text{ cm}$.



Magnificación

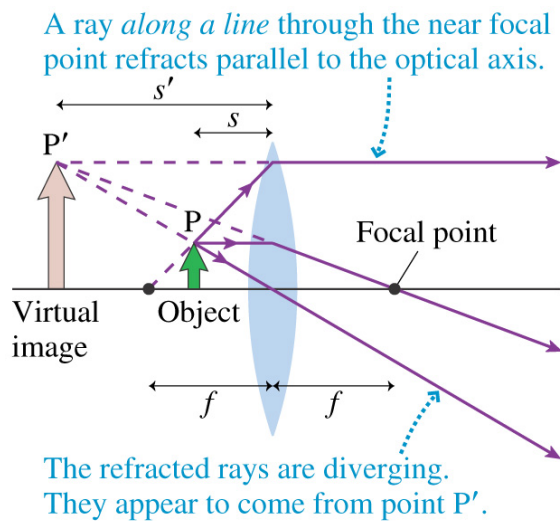
La imagen puede ser mayor o menor que el objeto, dependiendo de la localización y longitud focal de la lente.

1. La magnificación m como la relación de la altura de la imagen a la altura del objeto. Es útil para ampliar que la definición ha de incluir información acerca de la orientación de la imagen. La definición revisada de la magnificación, que llamamos M , es: $M = -h'/h = -s'/s$. Por lo que interpretamos:
2. Un valor positivo de M indica que la imagen está derecha relativa al objeto. Un valor negativo de M indica que la imagen está invertida relativa al objeto.

El valor absoluto de M da la relación de tamaño de la imagen y el objeto: $h'/h = |M|$. En el ejemplo anterior $M = -1,3 \text{ cm}/4 \text{ cm} = -0,325$; indicando que la imagen es invertida y un 32,5% del tamaño del objeto.

Imágenes virtuales

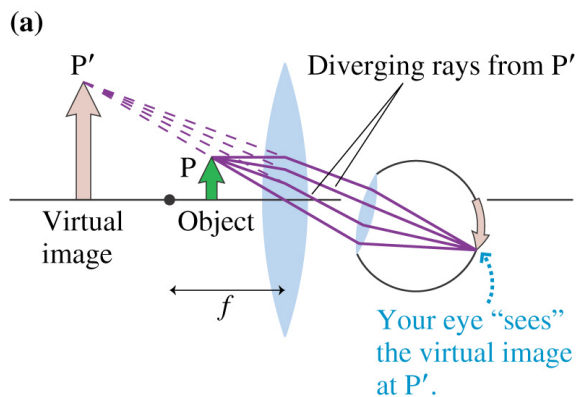
Hemos visto una lente convergente con un objeto a una distancia mayor de la longitud focal $s > f$. Es decir, el objeto alejado del punto focal. ¿Qué ocurre si el objeto está dentro del punto focal $s < f$?



Podemos ver que los tres rayos refractados no convergen. El rayo paralelo al eje que pasa por el foco alejado (otra parte) de la lente, el rayo que sale de la lente paralelo al eje y el rayo que pasa a través del centro de la lente. Los rayos divergen y parecen proceder del punto P' que es una imagen virtual del objeto punto P. Sin embargo es una imagen derecha, teniendo la misma orientación que la del objeto.

Los rayos refractados, que están a la derecha de la lente, parecen venir desde P', pero ninguno de los rayos han estado en aquel punto. Ninguna imagen aparecerá sobre una pantalla colocada en el plano de la imagen colocada en P'.

Los ojos focalizan los paquetes de rayos divergentes y vemos una imagen virtual pero mirando a través de la lente. Es lo que hace el microscopio.

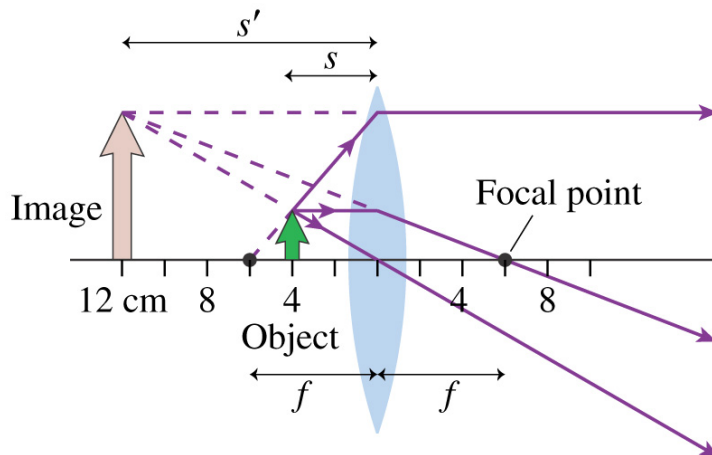


La distancia de la imagen s' para la imagen virtual es definida por ser un número negativo ($s' < 0$), indicando que la imagen está en el lado opuesto de la lente desde la imagen real. Con esta elección de signo, la definición de magnificación $M = -s'/s$, es válida. Una imagen virtual con negativo s' tiene $M > 0$, implicando que la imagen está derecha.

Magnificando una planta: para ver una flor mejor con una lente de longitud focal de 6 cm es mejor ponerla a 4 cm de la lente.

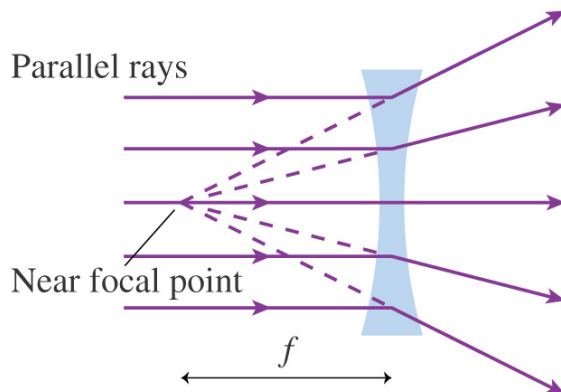
Trazando los tres rayos especiales que divergen desde la lente: el rayo paralelo al eje que refracta el rayo hacia el foco alejado, el rayo central.

El punto de la imagen virtual está a 12 cm a la izquierda de la lente ($s' = -12$ cm), imagen virtual. Por lo que la magnificación: $M = -s'/s = -(-12 \text{ cm})/4 \text{ cm} = 3$

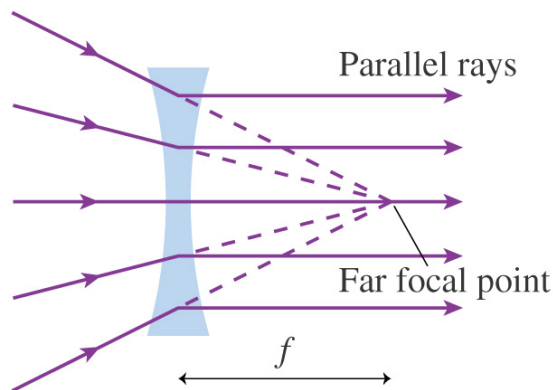


Lentes divergentes

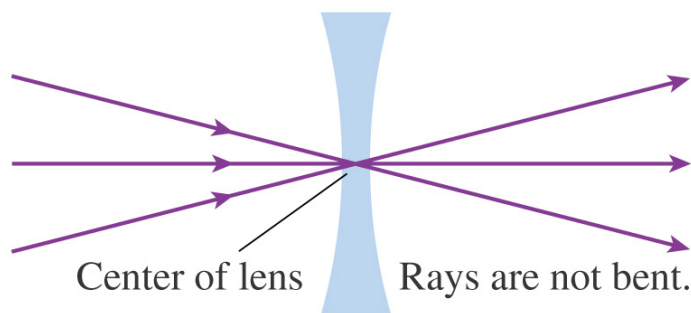
Una lente más gruesa en los bordes que en el centro es una lente divergente. En las figuras vemos tres series de rayos pasando a través de una lente divergente.



Any ray initially parallel to the optical axis diverges along a line through the near focal point.



Any ray directed along a line toward the far focal point emerges from the lens parallel to the optical axis.



Any ray directed at the center of the lens passes through in a straight line.

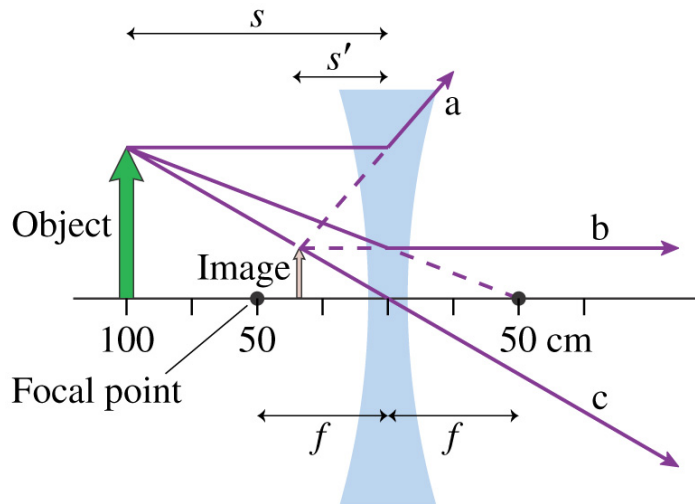
Trazado de rayos para una lente divergente:

1. Dibuja el eje óptico. Centra la lente sobre el eje. Representa el objeto con una flecha derecha a una distancia s . Coloca la base de la flecha sobre el eje.
2. Dibuja los **tres rayos especiales** desde la parte superior de la flecha. a) Un rayo paralelo al eje diverge a lo largo de una línea hacia el punto focal del mismo lado. b) Un rayo a lo largo de la línea hacia el punto focal del lado opuesto sale paralelo al eje. c) Un rayo a través del centro de la lente no se curva.
3. Traza los rayos que divergen hacia atrás. El punto del que divergen es el punto imagen, que es una imagen virtual. Mide la distancia s' que será un número negativo.

Empequeñecer una flor: Una lente divergente con una longitud focal de 50 cm se coloca a 100 cm de una planta. ¿Dónde está la imagen? y ¿cuál es su magnificación?.

En la figura se ve el diagrama de rayos. Los tres rayos especiales (a,b,c) no convergen. Sin embargo, ellos se pueden trazar hacia atrás para juntarse a unos 33 cm a la izquierda de la lente. Una imagen virtual se forma a $s' = -33$ cm. Siendo la magnificación: $M = -s'/s = -(-33 \text{ cm})/100 \text{ cm} = 0,33$.

La imagen que se ve mirando a través de la lente es un tercio del objeto y derecho.

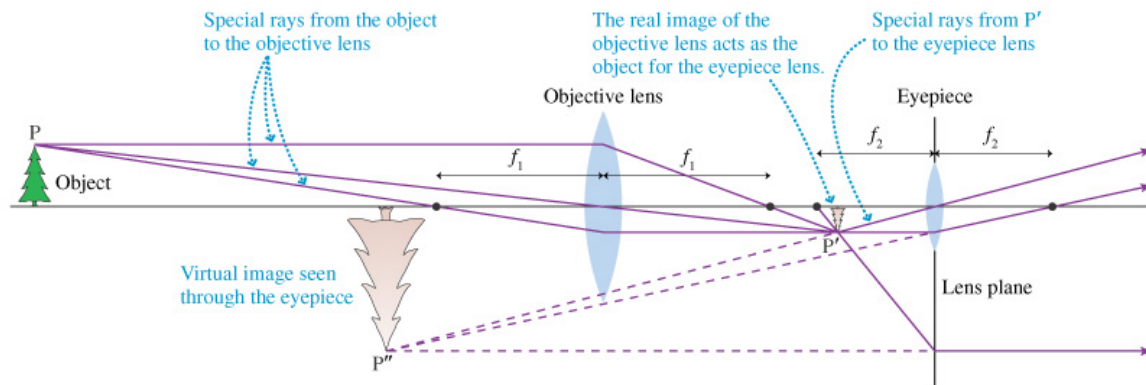


Las lentes divergentes siempre hacen una imagen virtual y, por esa razón, se usan raramente. Sin embargo, tienen importantes aplicaciones cuando se usan en combinación con otras lentes. Cámaras, oculares y otros objetos usan lentes divergentes.

Combinaciones de lentes

Los instrumentos ópticos (microscopios y cámaras) se construyen con varias lentes. Hay muchas razones para esto como la calidad de la imagen, la orientación y magnificación de la imagen.

Como ejemplo tenemos un telescopio similar al descubierto por Galileo con el que descubrió las lunas de Júpiter. Consiste en una lente convergente grande, llamada **objetivo**, y una lente convergente más pequeña usada como **ocular**. Las lentes están colocadas de tal forma que sus puntos focales casi coinciden.



Los rayos que pasan a través del objetivo convergen a una imagen real P' , pero los rayos no se paran aquí. Los rayos divergen desde P' cuando se aproximan a la segunda lente. Por lo que se refiere al ocular los rayos vienen desde P' , y así P' es el objeto para la segunda lente. En otras palabras, **la imagen de la primera lente en una combinación de lentes es el objeto para la segunda lente.**

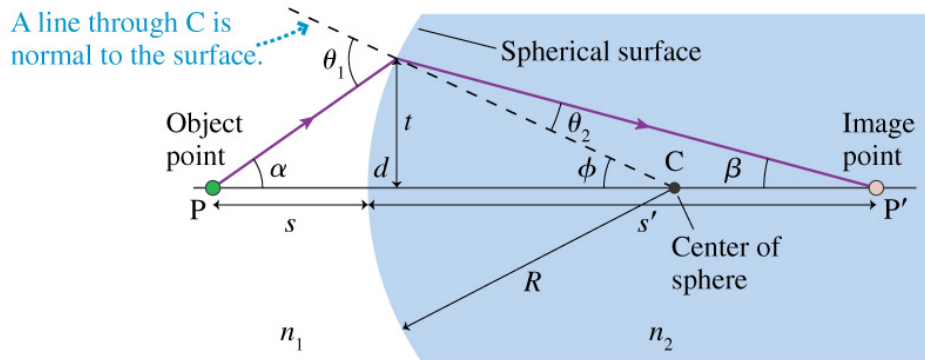
Los tres rayos especiales para la lente objetivo localiza la imagen P' , pero solamente uno de estos (paralelo al eje) es un rayo especial para el ocular. Sin embargo, estos no son los únicos rayos. Otros rayos dejarán P' en el ángulo correcto para ser los rayos especiales para el ocular. Esto es, una nueva serie de rayos especiales se dibujan desde P' a la segunda lente y usada para encontrar la imagen final en P'' .

El ocular actúa como magnificador porque su objeto P' está dentro del punto focal. Por lo que P'' es una imagen virtual ampliada e invertida que es vista mirando a través del ocular. El telescopio de Galileo produce una imagen invertida y esto no es un problema en astronomía. Otros telescopios producen imágenes derechas.

6.3.6 Lentes delgadas: teoría de la refracción

El trazado de rayos es una aproximación visual poderosa para conocer la formación de imágenes, pero no proporciona información precisa acerca de la localización de la imagen o de sus propiedades. Es por lo que es necesario desarrollar una relación cuantitativa entre la distancia del objeto s y la distancia de la imagen s' . Primero analizaremos la refracción en una superficie esférica, usando un método similar al análisis de formación de imágenes refractadas por una superficie plana. Entonces colocaremos dos superficies esféricas juntas para formar una lente.

En la figura se observa una superficie esférica entre dos medios transparentes con índices de refracción n_1 y n_2 . La esfera tiene un radio de curvatura R y está centrada en C . Consideramos un rayo que sale del objeto en el punto P en ángulo α y después de refractarse alcanza el punto P' . En la figura se exageran los ángulos ya que en realidad son rayos paraxiales viajando próximos al eje. En los rayos paraxiales los ángulos son muy pequeños.



El rayo desde P incide sobre la superficie en ángulo θ_1 y refracta en el medio n_2 en ángulo θ_2 , ambos medidos desde la normal a la superficie en el punto de incidencia. La ley de Snell para la refracción es: $n_1 \cdot \text{sen}\theta_1 = n_2 \cdot \text{sen}\theta_2$, que para ángulos muy pequeños es $n_1 \cdot \theta_1 = n_2 \cdot \theta_2$.

Se puede ver que: $\theta_1 = \alpha + \phi$; $\theta_2 = \phi - \beta$.

Por lo que la ley de Snell: $n_1(\alpha + \phi) = n_2(\phi - \beta)$.

Esta es una relación importante entre los ángulos.

La línea de altura t , desde el eje al punto de incidencia, es la vertical de tres triángulos diferentes de vértices en los puntos P, C y P'. Consecuentemente:

$$\tan \alpha \approx \alpha = \frac{t}{s+d} \quad \tan \beta \approx \beta = \frac{t}{s'-d} \quad \tan \phi \approx \phi = \frac{t}{R-d}$$

Pero d tiende a cero para rayos paraxiales, así

$$\alpha = \frac{t}{s} \quad \beta = \frac{t}{s'} \quad \phi = \frac{t}{R}$$

Esta es una segunda relación importante que viene de la geometría de la figura.

Si usamos los ángulos de la ecuación última en la ecuación primera:

$$\left\{ \begin{array}{l} n_1(\alpha + \phi) = n_2(\phi - \beta) \\ \alpha = \frac{t}{s} \quad \beta = \frac{t}{s'} \quad \phi = \frac{t}{R} \end{array} \right\} \Rightarrow n_1 \left(\frac{t}{s} + \frac{t}{R} \right) = n_2 \left(\frac{t}{R} - \frac{t}{s'} \right) \Rightarrow \boxed{\frac{n_1}{s} + \frac{n_2}{s'} = \frac{n_2 - n_1}{R}}$$

La ecuación es independiente del ángulo α . Consecuentemente, **todos los rayos paraxiales que salen del punto P posteriormente convergen en el punto P'**. Si un objeto se localiza a una distancia s desde una superficie de refracción esférica, se formará una imagen a una distancia s' dada por la ecuación anterior.

La ecuación anterior fue obtenida para una superficie que es convexa hacia el punto objeto, y la imagen es real. Sin embargo, el resultado también es válido para imágenes virtuales o para superficies que son

cóncavas hacia el punto objeto siempre y cuando que adoptemos la convención de signos para superficies refractantes:

Convención de signos para superficies refractantes		
	Positivo	Negativo
R	Convexo hacia el objeto	Cóncavo hacia el objeto
s'	Imagen real, lado opuesto desde el objeto	Imagen virtual, el mismo lado como el objeto

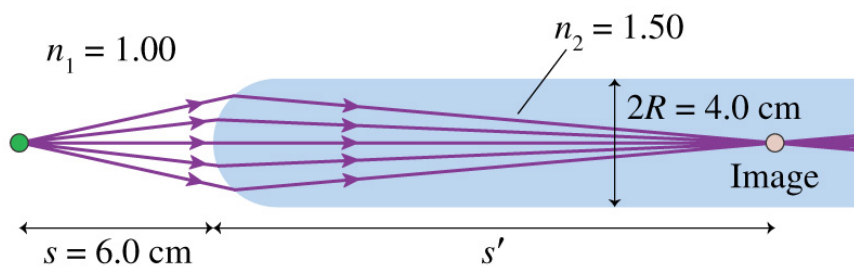
Anteriormente vimos que la formación de una imagen debido a la refracción por una superficie plana, y encontramos que la distancia de la imagen $s' = (n_2/n_1) \cdot s$. Un plano puede ser considerado como una esfera en el límite R tendiendo a infinito:

$$R \rightarrow \infty \Rightarrow \frac{n_2 - n_1}{R} \rightarrow 0$$

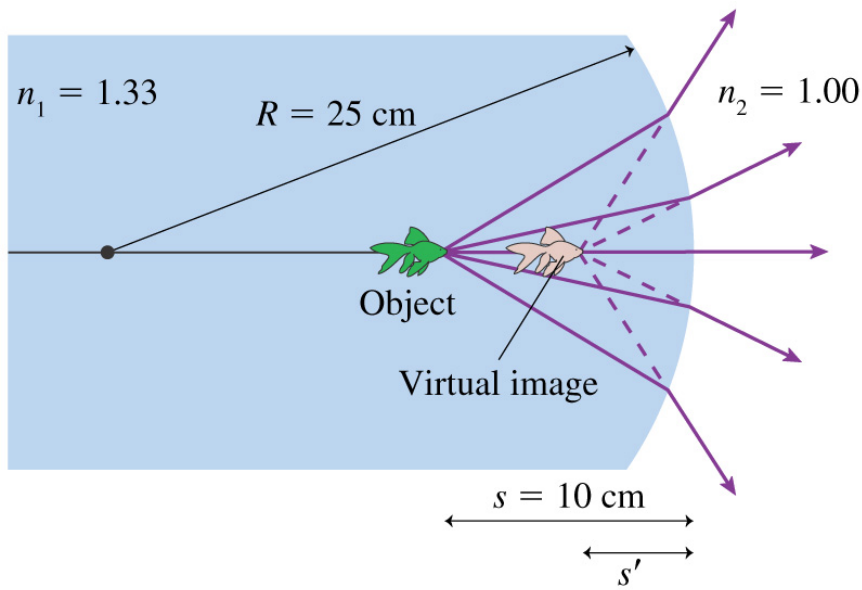
$$\frac{n_1}{s} + \frac{n_2}{s'} = \frac{n_2 - n_1}{R} = 0 \Rightarrow \frac{n_1}{s} = -\frac{n_2}{s'} \Rightarrow s' = -\frac{n_2}{n_1} s$$

Esto parece ser diferente a la ecuación de la superficie plana, pero no lo es. La ecuación de la superficie plana da la distancia actual a la imagen y esta nueva se basa en la convención de signos en la que la imagen virtual tiene distancia negativa a la imagen, de aquí el signo menos.

Formación de imagen dentro de una varilla de vidrio:

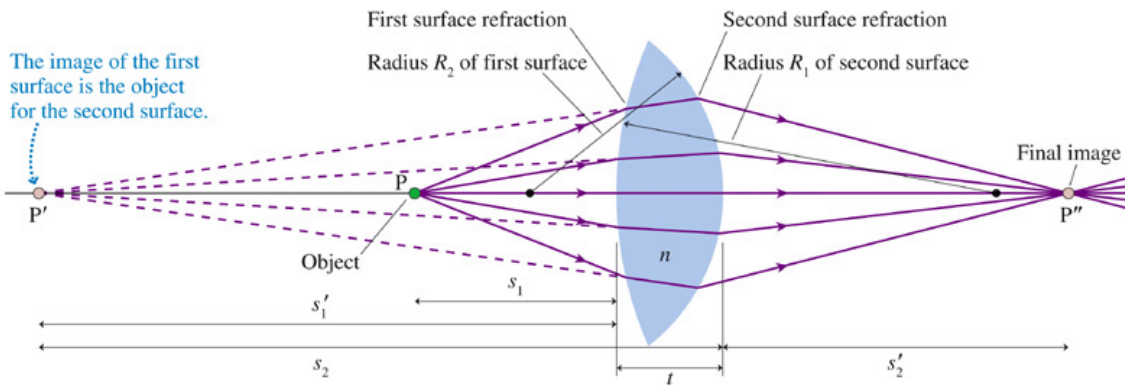


Un pez de colores en pecera:



Lentes

Las lentes consisten en dos superficies esféricas que tienen radio de curvatura R_1 y R_2 y de espesor t . El material de las lentes tiene un índice de refracción de n y consideramos que está rodeada de aire. Analizaremos la lente convergente por la siguiente figura, pero los resultados se aplicarán a cualquier lente si consideramos el criterio de signos de la tabla.



El objeto en el punto P está a s_1 a la izquierda de la lente. La primera superficie de la lente, de radio R_1 , refracta el rayo desde P para crear una imagen en el punto P'. Podemos usar la ecuación para superficies esféricas y encontrar la distancia imagen s'_1 :

$$\frac{n_1}{s} + \frac{n_2}{s'} = \frac{n_2 - n_1}{R} \Rightarrow \boxed{\frac{1}{s_1} + \frac{n}{s'_1} = \frac{n-1}{R_1}}$$

Siendo $n_1 = 1$ para el aire y $n_2 = n$ para la lente. Asumimos que la imagen P' es una imagen virtual.

La imagen P' de la primera superficie se convierte en el objeto por la segunda superficie. La distancia objeto s_2 desde P' a la segunda superficie será $s_2 = s'_1 + t$; pero P' es una imagen virtual de la primera superficie, así s'_1 es un número negativo. La distancia a la segunda superficie es $s_2 = |s'_1| + t = t - s'_1$.

Podemos encontrar la imagen de P' por una segunda aplicación de la ecuación pero con un cambio. Los rayos están incidiendo sobre la superficie desde dentro de la lente, así esta vez $n_1 = n$ y $n_2 = 1$:

$$\frac{n_1}{s} + \frac{n_2}{s'} = \frac{n_2 - n_1}{R} \Rightarrow \boxed{\frac{n}{t-s'_1} + \frac{1}{s'_2} = \frac{1-n}{R_2}}$$

Para una lente muy delgada, donde el espesor t se puede considerar cero, se puede solucionar las ecuaciones para encontrar la posición del punto de la imagen P''

$$t \rightarrow 0 \Rightarrow \boxed{-\frac{n}{s'_1} + \frac{1}{s'_2} = \frac{1-n}{R_2} = -\frac{n-1}{R_2}}$$

Nuestro objetivo es encontrar s'_2 del punto P'', la imagen producida por la lente como un todo. Este objetivo es fácilmente alcanzable si simplemente sumamos las dos ecuaciones:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{s_1} + \frac{n}{s'_1} = \frac{n-1}{R_1} \\ -\frac{n}{s'_1} + \frac{1}{s'_2} = \frac{1-n}{R_2} = -\frac{n-1}{R_2} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{s_1} + \frac{n}{s'_1} - \frac{n}{s'_1} + \frac{1}{s'_2} = \frac{n-1}{R_1} - \frac{n-1}{R_2} \\ \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s'_2} = \frac{n-1}{R_1} - \frac{n-1}{R_2} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \end{array} \right.$$

Los subíndices numéricos s_1 y s'_2 ya no sirven para nuestros propósitos. Si sustituimos s_1 por s , la distancia del objeto a la lente, y s'_2 por s' , la distancia imagen, obtendremos la ecuación de lente-delgada:

$$\boxed{\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)}$$

Donde la longitud focal de la lente está dada por

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

Ecuación de fabricación de lentes. Nos permite determinar la longitud focal de la forma de la lente y el material usado para hacerla. La convención de signos:

Convención de signos para lentes delgadas		
	Positivo	Negativo
R_1, R_2	Convexo hacia el objeto	Cóncavo hacia el objeto
f	Lente convergente, más gruesa en centro	Imagen virtual, el mismo lado como el objeto
s'	Imagen real, lado opuesto desde el objeto	Imagen virtual, el mismo lado como el objeto

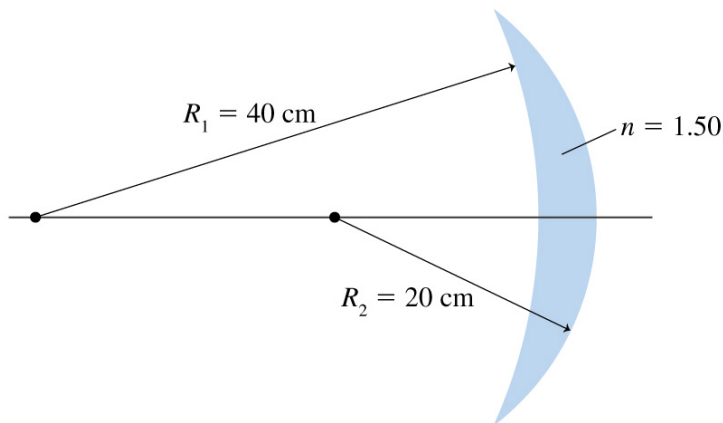
Longitud focal de una lente menisco (cóncavo por una cara y convexa por otra):

¿Cuál es la longitud focal de la lente menisco de vidrio de la figura? ¿Es convergente o divergente?

Si el objeto está situado a la izquierda, entonces la primera superficie tiene $R_1 = -40$ cm (cóncava hacia el objeto) y la segunda superficie tiene $R_2 = -20$ cm (también cóncava hacia el objeto). El índice de refracción del vidrio es $n = 1,50$ y la ecuación de fabricación de la lente

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = (1,50-1) \left(\frac{1}{-40\text{cm}} - \frac{1}{-20\text{cm}} \right) = 0,0125\text{cm}^{-1} \Rightarrow f = 80\text{cm}$$

Esta es una lente convergente, por el valor positivo de f y por el hecho de que es más gruesa en el centro.



Diseño de una lente ocular:

Una lente ocular para corregir la miopía es una lente divergente con un diseño planocóncavo. El paciente necesita una longitud focal de $-1,5$ m. Determina el radio de la superficie interna de la lente.

La imagen de la figura clarifica la forma de la lente y define el radio R_2 . El índice de refracción se toma $n = 1,59$.

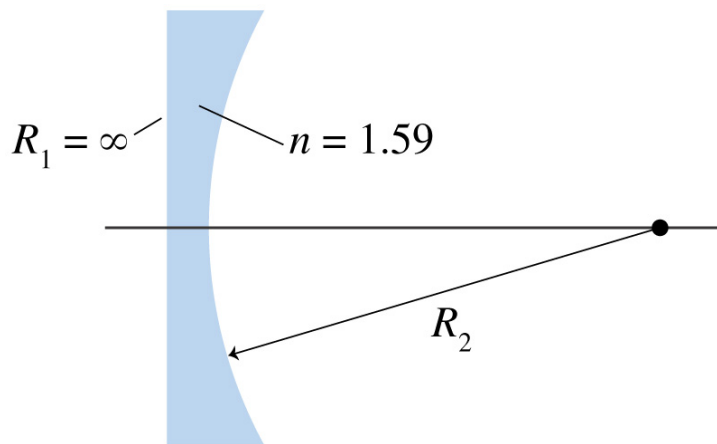
La superficie frontal de la lente es plana, que podemos considerar como una porción de una esfera con $R_1 \rightarrow \infty$, R_2 es positivo porque la segunda superficie es convexa hacia el objeto (considerando que el objeto está a la izquierda).

La ecuación de fabricación de la lente:

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \Rightarrow \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} = \frac{1}{(n-1)f}$$

$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_1} - \frac{1}{(n-1)f} = 0 - \frac{1}{(1,59-1)(-1,5\text{m})} = 1,13\text{m}^{-1} \Rightarrow R_2 = 0,885\text{m}$$

La medida en optometría de la lente no se hace por su longitud focal sino por su potencia, que es el inverso de la longitud focal: $P = f^{-1}$. La unidad de potencia es la dioptría definida como m^{-1} . Un paciente que necesite una longitud focal de $-1,5$ m tendrá una prescripción de $-0,67$ dioptría en la lente.



Lentes delgadas: formación de imagen

En la práctica la longitud focal de una lente viene especificada por el constructor. Podemos usar la ecuación de lentes delgadas para calcular exactamente donde una imagen de la lente se localiza. Alternativamente, podemos usar la ecuación de lente delgada para determinar la longitud focal de una lente necesaria para crear una imagen en una localización deseada.

Una lente de aumento:

Un coleccionista de sellos usa una lente de aumento que se coloque 2,0 cm por encima del sello. El aumento es de 4. Determina la longitud focal de la lente.

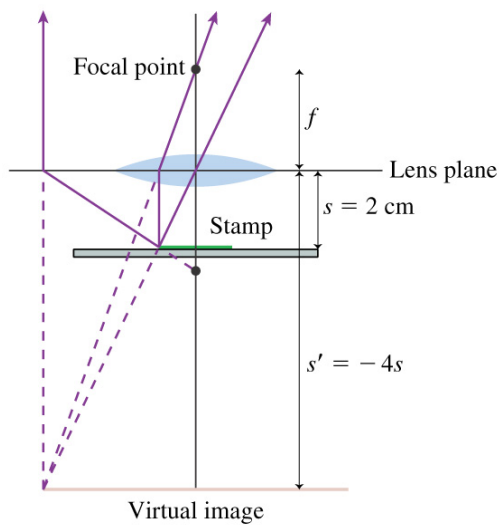
Una lente de aumento es una lente convergente con el objeto a una distancia menor que la longitud focal ($s < f$).

Una lente convergente.

Una imagen virtual es derecha: $M = +4 = -s'/s$; luego $s' = -4s = -4 \cdot (2,0 \text{ cm}) = -8,0 \text{ cm}$

La ecuación para una lente delgada nos permite calcular la longitud focal:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{2 \text{ cm}} + \frac{1}{-8 \text{ cm}} = 0,375 \text{ cm}^{-1} \Rightarrow f = 2,67 \text{ cm} > 2 \text{ cm}$$



Combinación de una lente de cámara

Una lente de cámara es usualmente una combinación de dos o más lentes. Considera una lente de la cámara formada por una lente divergente, con $f_1 = -120$ mm, y una lente convergente, con $f_2 = 42$ mm, separadas 60 mm. Un objeto de altura 10 cm está a 500 mm de la primera lente. a) ¿Cuál es la localización, tamaño y orientación de la imagen?. b) ¿Cuál es la longitud focal de una única lente que produzca una imagen en el mismo lugar si se coloca en el punto medio de la combinación de las lentes?. Esta longitud focal es una definición razonable de la longitud focal equivalente de la combinación de las lentes.

Cada lente es una lente delgada. La imagen de la primera lente es el objeto de la segunda lente.

En la figura se ven las dos lentes y el diagrama de rayos. El trazado de los rayos demuestra que la combinación de lentes producirá una imagen real invertida a unos 55 mm por detrás de la segunda lente. Podemos utilizar la ecuación de las lentes delgadas para hacer más precisa la estimación.

a) $s_1 = 500$ mm es la distancia del objeto a la primera lente. Su imagen es una imagen virtual, se encuentra en $s'_1 = -97$ mm

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

$$\frac{1}{s'_1} = \frac{1}{f_1} - \frac{1}{s_1} = \frac{1}{-120 \text{ mm}} - \frac{1}{500 \text{ mm}} = -0,0103 \text{ mm}^{-1} \Rightarrow s'_1 = -97 \text{ mm}$$

Esta distancia de la imagen es consistente con el diagrama de trazado de rayos. La imagen de la primera lente es ahora el objeto de la segunda lente. La distancia objeto es $s_2 = (97 \text{ mm} + 60 \text{ mm}) = 157$ mm. Una segunda aplicación de la ecuación de lentes delgadas:

$$\frac{1}{s'_2} = \frac{1}{f_2} - \frac{1}{s_2} = \frac{1}{42 \text{ mm}} - \frac{1}{157 \text{ mm}} = 0,0174 \text{ mm}^{-1} \Rightarrow s'_2 = 57 \text{ mm}$$

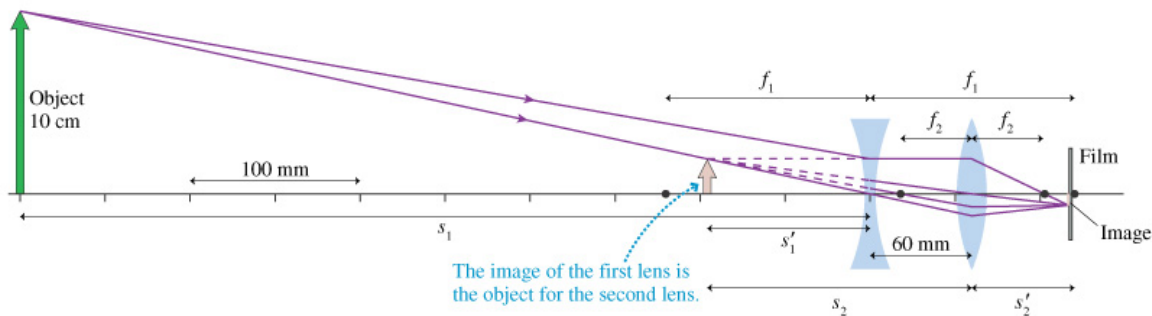
La imagen de la combinación de lentes está a 57 mm detrás de la segunda lente. La magnificación de las dos lentes:

$$\left\{ M_1 = -\frac{s'_1}{s_1} = -\frac{-97 \text{ mm}}{500 \text{ mm}} = +0,194 \right\} \left\{ M_2 = -\frac{s'_2}{s_2} = -\frac{57 \text{ mm}}{157 \text{ mm}} = -0,363 \right\} \quad M = M_1 M_2 = -0,070$$

La imagen está a 57 mm detrás de la segunda lente, invertida (M es negativa), y 0,70 altura.

b) Si una única lente se coloca en el punto medio entre estas dos lentes produce una imagen en el mismo plano, siendo la distancia de objeto e imagen: $s = (500 \text{ mm} + 30 \text{ mm}) = 530 \text{ mm}$; $s' = (57 \text{ mm} + 30 \text{ mm}) = 87 \text{ mm}$. Aplicando la ecuación de lentes delgadas se obtiene una longitud focal equivalente de 75 mm:

$$\frac{1}{f_{\text{eq}}} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{530 \text{ mm}} + \frac{1}{87 \text{ mm}} = 0,0134 \text{ mm}^{-1} \Rightarrow f_{\text{eq}} = 75 \text{ mm}$$



Aberraciones de la lente

Se utilizan combinaciones de lentes para obtener una imagen en lugar de una lente, por dos razones.

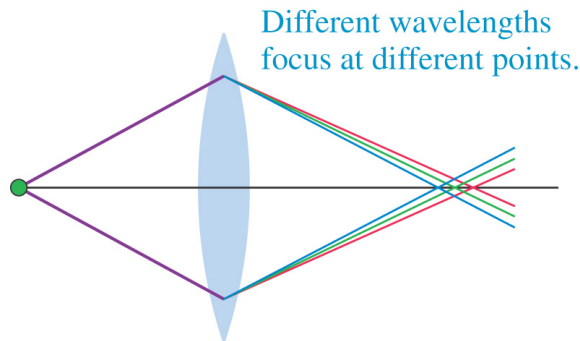
Primera, una lente tiene dispersión. Esto es, su índice de refracción varía ligeramente con la longitud de onda. Como el índice de refracción para la luz violeta es mayor que para la luz roja, la longitud focal de la lente se acorta para la luz ultravioleta respecto de la luz roja. Por ello, diferentes colores de luz van a un foco a un foco a diferentes distancias de la lente. Si la luz roja está focalizada claramente sobre una pantalla entonces la luz azul y violeta no lo están. Este error en la imagen se llama aberración cromática.

Segunda, nuestro análisis de formación de imágenes se basa en que los rayos paraxiales viajan muy próximos al eje óptico. Esto nos permite la aproximación para pequeños ángulos. Un análisis más exacto, tomando todos los rayos en cuenta, encuentra que rayos incidentes sobre los bordes exteriores de la superficie esférica no se focalizan exactamente en el mismo punto como los rayos incidentes próximos al centro. Este error en la imagen se llama aberración esférica. Esto es la causa de que la imagen sea borrosa, se incrementa a medida que la lente aumenta su diámetro.

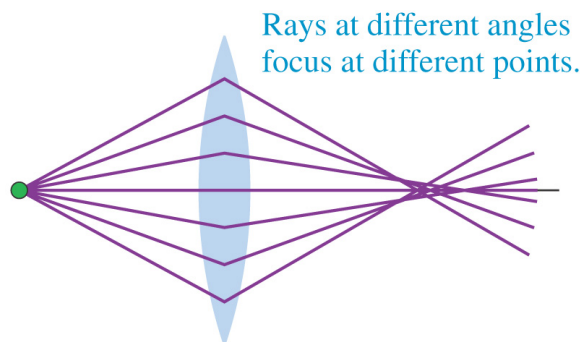
Afortunadamente las aberraciones de una lente convergente y de una lente divergente están en dirección opuesta. Cuando una lente convergente y una lente divergente se combinan su aberración tiende a

cancelarse. Es por lo que cámaras, microscopios y otros equipamientos ópticos usan combinaciones de lentes en lugar de una única lente.

(a) Chromatic aberration



(b) Spherical aberration



6.3.7 La resolución de los instrumentos ópticos

De acuerdo al modelo de rayos de la luz, una lente perfecta que no tenga aberraciones será capaz de formar una imagen perfecta. Pero el modelo de rayos de luz, es bueno para las lentes pero no es correcto para describir la luz.

En la figura a) se observa una onda plana siendo focalizada por una lente de diámetro D . Solamente las ondas que pasan a través de la lente pueden focalizarse, por lo que la lente actúa como una apertura circular en una barrera opaca. Es decir, la lente focaliza y difracta ondas de luz.

En la figura b) se separan estos dos efectos perdiéndose la difracción por poner la lente detrás de una apertura circular de diámetro D .

En la figura c) una lente detrás de una apertura circular recoge todos los rayos de luz difractando en ángulo θ y llevándolos hacia el plano focal de la lente. El resultado neto es que la imagen de un paquete paralelo de rayos no es un punto perfecto, en su lugar una figura de difracción circular.

El ángulo del primer mínimo de la figura de difracción circular es $\theta_1 = 1,22 \cdot \lambda / D$. El rayo que pasa a través del centro de una lente no se dobla, siendo la posición de la franja negra $y_1 = f \cdot \tan \theta_1 = f \cdot \theta_1$. Por lo que la anchura del máximo central en el plano focal es:

$$w = 2 \cdot f \cdot \theta_1 = 2 \cdot 1,22 \cdot \lambda / D = 2,44 \cdot \lambda / D \text{ (tamaño del punto mínimo)}$$

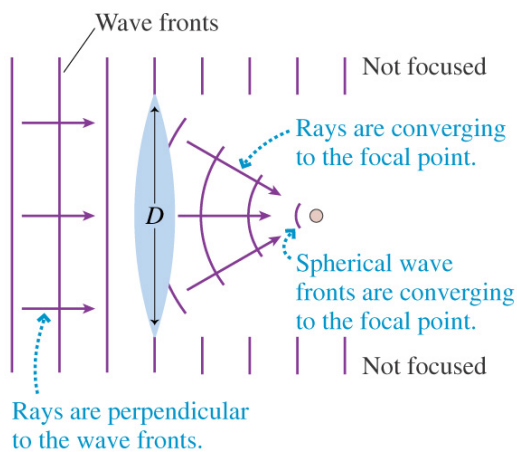
El tamaño del punto mínimo al cual una lente puede focalizar la luz.

Las lentes frecuentemente están limitadas por aberraciones, por lo que no todas las lentes pueden focalizar a un punto mínimo. Una lente bien elaborada, para la cual ese es el tamaño de punto mínimo, se llama lente de difracción limitada.

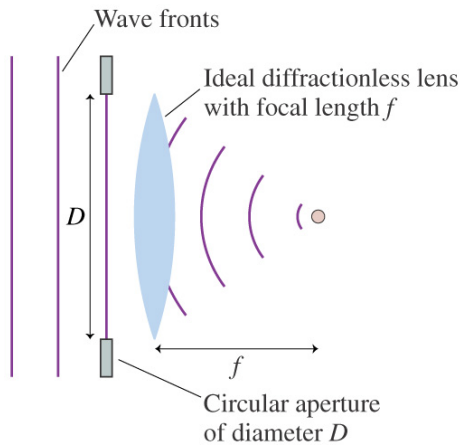
Por varias razones es difícil producir una lente de difracción limitada teniendo una longitud focal menor que su diámetro. Es decir $f \geq D$. Esto implica que el menor diámetro para el que podemos focalizar un punto de luz, no importa lo que nos esforcemos, es $w_{\min} = 2,5 \cdot \lambda$. Esto es un límite fundamental para la construcción de equipamiento óptico.

Esto limita la tecnología en la construcción de microchips ya que el más pequeño está en $2,5 \cdot \lambda$. Si se proyecta una luz ultravioleta de 200 nm entonces el elemento más pequeño sobre un chip es de unos 0,50 μm de ancho. Lo que limita la tecnología.

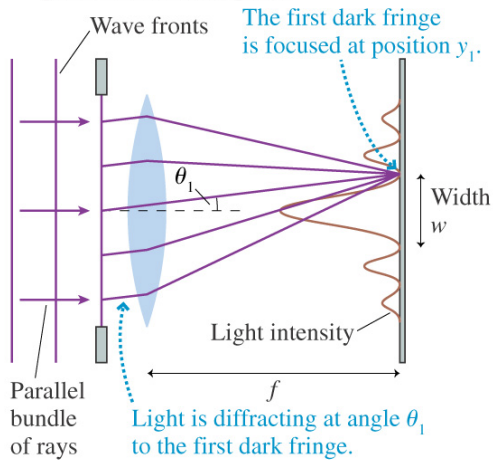
(a) A lens acts as a circular aperture.



(b) The aperture and focusing effects can be separated.



(c) The lens produces a diffraction pattern in the focal plane.



Mirando las estrellas:

Un telescopio tiene una lente de diámetro 12 cm con una longitud focal de 1,0 m. Determina el diámetro de la imagen de una estrella en el plano focal si la lente es de difracción limitada y la atmósfera de la Tierra no limita.

Las estrellas están tan alejadas que aparecen como puntos en el espacio. Una lente que pierda la difracción puede focalizar su luz en un punto pequeño.

El punto mínimo es: $w = 2,44 \cdot \lambda / D$. D es el diámetro de la lente y la longitud de onda con la que emite la estrella usamos la máxima de la longitud de onda visible (700 nm).

$$w = 2,44 \cdot \lambda / D = 14 \mu\text{m}.$$

Esto es muy pequeño y aparecerá como un punto.

Resolución

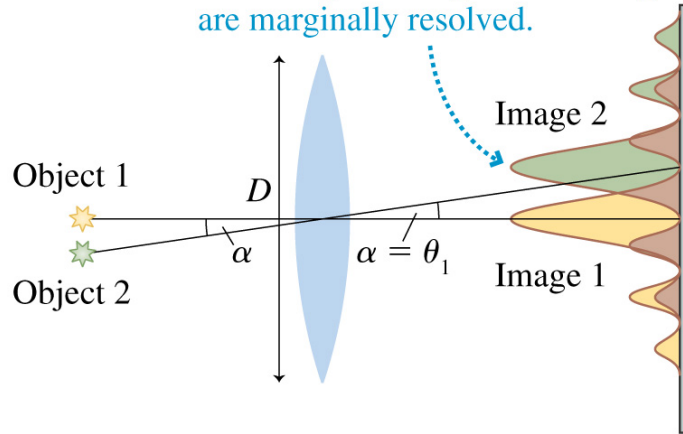
Supongamos que apuntamos con el telescopio a dos estrellas próximas en una galaxia muy alejada. Si usamos el detector mejor que separe las imágenes para dos estrellas y que no se oculten como en una sola gota de luz.

Lord Rayleigh estudió el problema de la resolución o distinción de objetos por los instrumentos ópticos (telescopios y microscopios) y estableció un criterio.

En la imagen se ven dos objetos obteniendo su imagen por una lente de diámetro D . La separación angular entre los objetos es α . El **criterio de Rayleigh** establece:

1. Los dos objetos se resuelven si $\alpha > \theta_1$, donde $\theta_1 = 1,22 \cdot \lambda / D$ es el ángulo de la primera franja negra en una figura de difracción circular.
2. Los dos objetos no se resuelven si $\alpha < \theta_1$ porque sus figuras están demasiado solapadas.
3. Los dos objetos son ligeramente resueltos si $\alpha = \theta_1$. El máximo central de una imagen cae exactamente por encima de la primera franja negra de la otra imagen.

Maximum of image 2 falls on first dark fringe of image 1. The images are marginally resolved.



Problemas de "Óptica"

- 1) Un rayo de luz pasa del agua al aire con un ángulo de incidencia de 30° respecto a la normal. Dibuje en un esquema los rayos incidente y refractado y calcule el ángulo de refracción. ¿Cuál debería ser el ángulo de incidencia para que el rayo refractado fuera paralelo a la superficie de separación agua-aire?. Dato: índice de refracción del agua respecto al aire $n = 1,3$. [40,5° en el agua; 50,3° el ángulo de incidencia]
- 2) Un haz de luz de $5,0 \cdot 10^4$ Hz viaja por el interior de un diamante. a) Determine la velocidad de propagación y la longitud de onda de esa luz en el diamante. b) Si la luz emerge del diamante al aire con un ángulo de refracción de 10° , dibuje la trayectoria del haz y determine el ángulo de incidencia. Datos: $c = 3 \cdot 10^8$ m/s; $n_{\text{diamante}} = 2,42$. [a) $1,24 \cdot 10^8$ m/s; 2.480 m; b) $4,11^\circ$]
- 3) Un rayo de luz monocromática incide en una de las caras de una lámina de vidrio, de caras planas y paralelas, con un ángulo de incidencia de 30° . La lámina está situada en el aire, su espesor es de 5 cm y su índice de refracción 1,5. a) Dibuje el camino seguido por el rayo y calcule el ángulo que forma el rayo que emerge de la lámina con la normal. b) Calcule la longitud recorrida por el rayo en el interior de la lámina. [a) 30° ; b) 0,15 m]
- 4) El láser de un reproductor de CD genera luz con una longitud de onda de 780 nm medida en el aire. a) Explique qué características de la luz cambian al penetrar en el plástico del CD y calcule la velocidad de la luz en él. b) Si la luz láser incide en el plástico con un ángulo de 30° , determine el ángulo de refracción. Datos: $c = 3 \cdot 10^8$ m/s; $n_{\text{aire}} = 1$; $n_{\text{plástico}} = 1,55$. [a) $1,9355 \cdot 10^8$ m/s; b) $18,82^\circ$]
- 5) a) Indique qué se entiende por foco y por distancia focal de un espejo. ¿Qué es una imagen virtual?. b) Con ayuda de un diagrama de rayos, describa la imagen formada por un espejo convexo para un objeto situado entre el centro de curvatura y el foco.
- 6) Un rayo de luz amarilla, emitido por una lámpara de vapor de sodio, posee una longitud de onda en el vacío de $5,9 \cdot 10^{-9}$ m. a) Determine la frecuencia, velocidad de propagación y longitud de onda de la luz en el interior de una fibra óptica de índice de refracción 1,5. b) ¿Cuál es el ángulo de incidencia mínimo para que un rayo que incide en la pared interna de la fibra no salga al exterior? ¿Cómo se denomina este ángulo?. Dato: $c = 3 \cdot 10^8$ m s⁻¹.
- 7) a) Enuncie y explique, utilizando los esquemas adecuados, las leyes de la reflexión y refracción de la luz. b) Un rayo láser pasa de un medio a otro, de menor índice de refracción. Explique si el ángulo de refracción es mayor o menor que el de incidencia ¿Podría existir reflexión total?.
- 8) a) ¿Qué se entiende por refracción de la luz? Explique que es el ángulo límite y, utilizando un diagrama de rayos, indique cómo se determina. b) Una fibra óptica es un hilo transparente a lo largo del cual puede propagarse la luz, sin salir al exterior. Explique por qué la luz "no se escapa" a través de las paredes de la fibra.
- 9) Construya la imagen de un objeto situado a una distancia entre f y $2f$ de una lente: a) Convergente. b) Divergente. Explique en ambos casos las características de la imagen.
- 10) a) Si queremos ver una imagen ampliada de un objeto, ¿qué tipo de espejo tenemos que utilizar? Explique, con ayuda de un esquema, las características de la imagen formada. b) La nieve refleja casi toda la luz que incide en su superficie. ¿Por qué no nos vemos reflejados en ella?
- 11) a) Explique en qué consiste la reflexión total. ¿En qué condiciones se produce?. b) ¿Por qué la profundidad real de una piscina llena de agua es mayor que la profundidad aparente?
- 12) Un haz de luz roja penetra en una lámina de vidrio, de 30 cm de espesor, con un ángulo de incidencia de 45° . a) Explique si cambia el color de la luz al penetrar en el vidrio y determine el ángulo de refracción.

b) Determine el ángulo de emergencia (ángulo del rayo que sale de la lámina con la normal). ¿Qué tiempo tarda la luz en atravesar la lámina de vidrio?. Datos: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$; $n_{\text{vidrio}} = 1,3$.

13) Un haz de luz monocromática de frecuencia $5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ se propaga por el aire. a) Explique qué características de la luz cambian al penetrar en una lámina de vidrio y calcule la longitud de onda. b) ¿Cuál debe ser el ángulo de incidencia en la lámina para que los rayos reflejado y refractado sean perpendiculares entre sí?. Datos: $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$; $n_{\text{vidrio}} = 1,2$.

14) a) Explique los fenómenos de reflexión y refracción de la luz. b) Describa, con la ayuda de un esquema, qué ocurre cuando un haz de luz monocromática incide con un cierto ángulo sobre una superficie de separación de dos medios de distinto índice de refracción. Si el segundo medio tiene menor índice de refracción que el primero, ¿podemos garantizar que se producirá siempre refracción?

15) Un rayo de luz monocromática emerge desde el interior de un bloque de vidrio hacia el aire. Si el ángulo de incidencia es de $19,5^\circ$ y el de refracción de 30° . a) Determine el índice de refracción y la velocidad de propagación de la luz en el vidrio. b) Como sabe, pueden existir ángulos de incidencia para los que no hay rayo refractado; es decir, no sale luz del vidrio. Explique este fenómeno y calcule los ángulos para los que tiene lugar. Datos: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$; $n_{\text{aire}} = 1,3$.

16) Un rayo de luz, cuya longitud de onda en el vacío es $6 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ se propaga a través del agua. a) Defina el índice de refracción y calcule la velocidad de propagación y la longitud de onda de esa luz en el agua. b) Si el rayo emerge del agua al aire con un ángulo de 30° , determine el ángulo de incidencia del rayo en la superficie del agua. Datos: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$; $n_{\text{agua}} = 1,33$.

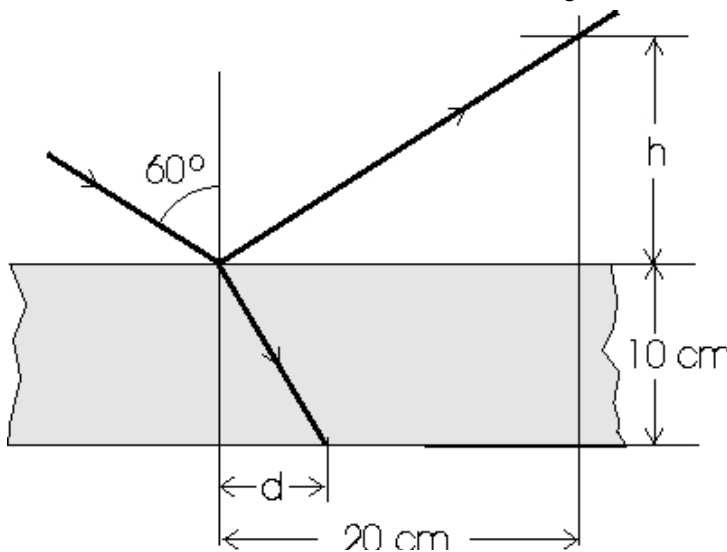
17) Construya gráficamente la imagen de: a) Un objeto situado a $0,5 \text{ m}$ de distancia de un espejo cóncavo de 2 m de radio. b) Un objeto situado a la misma distancia delante de un espejo plano. Explique en cada caso las características de la imagen y compare ambas situaciones.

18) a) Explique, con ayuda de un esquema, los fenómenos de refracción de la luz y de reflexión total. b) El índice de refracción de las sustancias disminuye al aumentar la longitud de onda. ¿Se desviará más la luz roja o la azul cuando los rayos inciden en el agua desde el aire? Razone la respuesta.

19) a) ¿Por qué la profundidad real de una piscina llena de agua es siempre mayor que la profundidad aparente?. b) Explique qué es el ángulo límite y bajo qué condiciones puede observarse.

20) a) Construya gráficamente la imagen obtenida en un espejo cóncavo de un objeto situado entre el espejo y el foco. ¿Qué características tiene dicha imagen?. b) Los espejos convexos se emplean, por sus características, en los retrovisores de los automóviles, en los espejos de los cruces en las calles, etc. Explique por qué.

21) Una lámina de vidrio, de índice de refracción $1,5$, de caras paralelas y espesor 10 cm , está colocada en el aire. Sobre una de sus caras incide un rayo de luz, como se muestra en la figura. Calcule: a) La altura h y la distancia d marcadas en la figura. b) El tiempo que tarda la luz en atravesar la lámina. Dato: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$.



22) Un rayo de luz monocromática, que posee una longitud de onda de $6 \cdot 10^{-7}$ m en el aire, incide con un ángulo de 30° sobre la superficie del agua, cuyo índice de refracción es 1,33. Calcule: a) La frecuencia, la velocidad de propagación y la longitud de onda de la luz en el agua. b) El ángulo que forman entre sí el rayo reflejado y el refractado. Dato: $c = 3 \cdot 10^8$ m s $^{-1}$.

23) Una onda de radio, de frecuencia 25 MHz y amplitud $2 \cdot 10^{-4}$ V m $^{-1}$, se propaga a lo largo del eje OX por un medio cuyo índice de refracción es 1,5. a) Calcule la velocidad de propagación y la longitud de onda en este medio. b) Escriba la ecuación del campo eléctrico de la onda. Dato: $c = 3 \cdot 10^8$ m s $^{-1}$.

24) Un haz de luz que viaja por el aire incide sobre un bloque de vidrio. Los haces reflejado y refractado forman ángulos de 30° y 20° , respectivamente, con la normal a la superficie del bloque. a) Calcule la velocidad de la luz en el vidrio y el índice de refracción de dicho material. b) Explique qué es el ángulo límite y determine su valor para el caso descrito. Dato: $c = 3 \cdot 10^8$ m s $^{-1}$.

25) a) Explique qué es una imagen real y una imagen virtual y señale alguna diferencia observable entre ellas. b) ¿Puede formarse una imagen virtual con un espejo cóncavo? Razone la respuesta utilizando las construcciones gráficas que considere oportunas.

26) Un rayo de luz pasa de un medio a otro, en el que se propaga a mayor velocidad. a) Indique cómo varían la longitud de onda, la frecuencia y el ángulo que forma dicho rayo con la normal a la superficie de separación, al pasar del primero al segundo medio. b) Razone si el rayo de luz pasará al segundo medio, independientemente de cuál sea el valor del ángulo de incidencia.

27) Un rayo de luz que se propaga por un medio a una velocidad de 165 km/s penetra en otro medio en el que la velocidad de propagación es 230 km/s. a) Dibuje la trayectoria que sigue el rayo en el segundo medio y calcule el ángulo que forma con la normal si el ángulo de incidencia es de 30° . b) ¿En qué medio es mayor el índice de refracción? Justifique la respuesta.

28) a) Razone si tres haces de luz visible de colores azul, amarillo y rojo, respectivamente: i) tienen la misma frecuencia; ii) tienen la misma longitud de onda; iii) se propagan en el vacío con la misma velocidad. ¿Cambiaría alguna de estas magnitudes al propagarse en el agua?. b) ¿Qué es la reflexión total de la luz? ¿Cuándo puede ocurrir?.

29) Un rayo de luz monocromática incide en una de las caras de una lámina de vidrio, de caras planas y paralelas, con un ángulo de incidencia de 30° . La lámina está situada en el aire, su espesor es de 5 cm y su índice de refracción 1,5. a) Dibuje el camino seguido por el rayo y calcule el ángulo que forma el rayo que emerge de la lámina con la normal. b) Calcule la longitud recorrida por el rayo en el interior de la lámina.

30) a) Explique los fenómenos de reflexión y refracción de la luz con ayuda de un esquema. b) Un haz de luz pasa del aire al agua. Razone cómo cambian su frecuencia, longitud de onda y velocidad de propagación.

31) Un rayo luminoso que se propaga en el aire incide sobre el agua de un estanque formando un ángulo de 20° con la normal. a) ¿Qué ángulo formarán entre sí los rayos reflejado y refractado?. b) Variando el ángulo de incidencia, ¿podría producirse el fenómeno de reflexión total? Razone la respuesta. Datos: $n_{\text{aire}} = 1$; $n_{\text{agua}} = 1,33$.

32) Dibuje la marcha de los rayos e indique el tipo de imagen formada con una lente convergente si: a) la distancia objeto, s , es igual al doble de la focal, f ; b) la distancia objeto es igual a la focal.

33) El ángulo límite vidrio-agua es de 60° . Un rayo de luz, que se propaga por el vidrio, incide sobre la superficie de separación con un ángulo de 45° y se refracta dentro del agua. a) Explique qué es el ángulo límite y determine el índice de refracción del vidrio. b) Calcule el ángulo de refracción en el agua. $n_{\text{aire}} = 1$; $n_{\text{agua}} = 1,33$.

34) Un foco luminoso puntual está situado bajo la superficie de un estanque de agua. a) Un rayo de luz pasa del agua al aire con un ángulo de incidencia de 30° . Dibuje en un esquema los rayos incidente y refractado y calcule el ángulo de refracción. b) Explique qué es el ángulo límite y determine su valor para este caso. $n_{\text{aire}} = 1$; $n_{\text{agua}} = 1,33$.

35) Razone las respuestas a las siguientes cuestiones: a) Cuando un rayo pasa a un medio con mayor índice de refracción, ¿se acerca o se aleja de la normal?. b) ¿Qué es el ángulo límite? ¿Existe este ángulo en la situación anterior?

36) a) Enuncie las leyes de la reflexión y de la refracción de la luz, explicando las diferencias entre ambos fenómenos. b) Un rayo de luz pasa de un medio a otro más denso. Indique cómo varían las siguientes magnitudes: amplitud, frecuencia, longitud de onda y velocidad de propagación.

37) Es corriente utilizar espejos convexos como retrovisores en coches y camiones o en vigilancia de almacenes, con objeto de proporcionar mayor ángulo de visión con un espejo de tamaño razonable. a) Explique con ayuda de un esquema las características de la imagen formada en este tipo de espejos. b) En estos espejos se suele indicar: “Atención, los objetos están más cerca de lo que parece”. ¿Por qué parecen estar más alejados?.

38) Un haz de luz de $5 \cdot 10^4$ Hz viaja por el interior de un diamante. a) Determine la velocidad de propagación y la longitud de onda de esa luz en el diamante. b) Si la luz emerge del diamante al aire con un ángulo de refracción de 10° , dibuje la trayectoria del haz y determine el ángulo de incidencia. Dato: $c = 3 \cdot 10^8$ m s⁻¹; $n_{\text{diamante}} = 2,42$.

39) a) Explique la formación de imágenes y sus características en una lente divergente. b) ¿Pueden formarse imágenes virtuales con lentes convergentes? Razone la respuesta.

40) Un haz de luz láser cuya longitud de onda en el aire es $550 \cdot 10^{-9}$ m incide en un bloque de vidrio. a) Describa con ayuda de un esquema los fenómenos ópticos que se producen. b) Si el ángulo de incidencia es de 40° y el de refracción 25° , calcule el índice de refracción del vidrio y la longitud de onda de la luz láser en el interior del bloque. $n_{\text{aire}} = 1$.

41) Sobre la superficie de un bloque de vidrio de índice de refracción 1,60 hay una capa de agua de índice 1,33. Una luz amarilla de sodio, cuya longitud de onda en el aire es $589 \cdot 10^{-9}$ m, se propaga por el vidrio hacia el agua. a) Describa el fenómeno de reflexión total y determine el valor del ángulo límite para esos dos medios. b) Calcule la longitud de onda de la luz cuando se propaga por el vidrio y por el agua. Dato: $c = 3 \cdot 10^8$ m s⁻¹.

42) Un haz láser que se propaga por un bloque de vidrio tiene una longitud de onda de 550 nm. El haz emerge hacia el aire con un ángulo de incidencia de 25° y un ángulo de refracción de 40° . a) Calcule el índice de refracción del vidrio y la longitud de onda de la luz láser en el aire. b) Razone para qué valores del ángulo de incidencia el haz láser no sale del vidrio. Dato: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$; $n_{\text{aire}} = 1$.

43) Un rayo de luz de frecuencia $5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ penetra en una lámina de vidrio de caras paralelas con un ángulo de incidencia de 30° . a) Dibuje en un esquema los rayos incidente, refractado en el vidrio y emergente al aire y determine los ángulos de refracción y de emergencia. b) Explique qué características de la luz cambian al penetrar en el vidrio y calcule la velocidad de propagación dentro de la lámina Dato: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$; $n_{\text{vidrio}} = 1,5$.

44) a) Un rayo de luz monocromática emerge al aire, desde el interior de un bloque de vidrio, en una dirección que forma un ángulo de 30° con la normal a la superficie. Dibuje en un esquema los rayos incidente y refractado y calcule el ángulo de incidencia y la velocidad de propagación de la luz en el vidrio. b) ¿Existen ángulos de incidencia para los que no sale luz del vidrio? Explique este fenómeno y calcule el ángulo límite. Dato: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$; $n_{\text{vidrio}} = 1,5$; $n_{\text{aire}} = 1$.

45) a) Formación de imágenes en espejos. b) Los fabricantes de espejos retrovisores para automóviles advierten que los objetos pueden estar más cerca de lo que parece en el espejo. ¿Qué tipo de espejo utilizan y por qué se produce ese efecto? Justifique la respuesta mediante un diagrama de rayos.

46) Un rayo de luz incide desde el aire en una lámina de vidrio con un ángulo de 30° . Las longitudes de onda en el aire de las componentes azul y roja de la luz son, respectivamente, $\lambda(\text{azul}) = 486 \text{ nm}$ y $\lambda(\text{roja}) = 656 \text{ nm}$. a) Explique con ayuda de un esquema cómo se propaga la luz en el vidrio y calcule el ángulo que forman los rayos azul y rojo. ¿Se propagan con la misma velocidad?. Justifique la respuesta. b) Determine la frecuencia y la longitud de onda en el vidrio de la componente roja. Dato: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$; $n_{\text{vidrio}(\text{azul})} = 1,7$; $n_{\text{vidrio}(\text{rojo})} = 1,6$.

47) Un haz de luz que se propaga por el interior de un bloque de vidrio incide sobre la superficie del mismo de modo que una parte del haz se refleja y la otra se refracta al aire, siendo el ángulo de reflexión 30° y el de refracción 40° . a) Calcule razonadamente el ángulo de incidencia del haz, el índice de refracción del vidrio y la velocidad de propagación de la luz en el vidrio. b) Explique el concepto de ángulo límite y determine su valor para el caso descrito. Dato: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$.

Preguntas de teoría de Óptica

1. a) Construya gráficamente la imagen obtenida en un espejo cóncavo de un objeto situado entre el espejo y el foco. ¿Qué características tiene dicha imagen? b) Los espejos convexos se emplean, por sus características, en los retrovisores de los automóviles, en los espejos de los cruces en las calles, etc. Explique por qué.

2. a) Explique qué es una imagen real y una imagen virtual y señale alguna diferencia observable entre ellas. b) ¿Puede formarse una imagen virtual con un espejo cóncavo? Razone la respuesta utilizando las construcciones gráficas que considere oportunas.

3. Es corriente utilizar espejos convexos como retrovisores en coches y camiones o en vigilancia de almacenes, con objeto de proporcionar mayor ángulo de visión con un espejo de tamaño razonable. a) Explique con ayuda de un esquema las características de la imagen formada en este tipo de espejos. b) En estos espejos se suele indicar: "Atención, los objetos están más cerca de lo que parece". ¿Por qué parece estar más alejados?

4. a) Explique la formación de imágenes y sus características en una lente divergente. b) ¿Pueden formarse imágenes virtuales con lentes convergentes? Razone la respuesta.

5. a) Construya la imagen formada con una lente convergente de un objeto situado a una distancia, s , de la lente igual al doble de la distancia focal, f , y comente sus características. b) ¿Pueden formarse imágenes virtuales con lentes convergentes? Razone la respuesta.
6. a) Formación de imágenes en espejos. b) Los fabricantes de espejos retrovisores para automóviles advierten que los objetos pueden estar más cerca de lo que parece en el espejo. ¿Qué tipo de espejo utilizan y por qué se produce ese efecto? Justifique la respuesta mediante un diagrama de rayos.
7. a) Explique la formación de imágenes por un espejo convexo y, como ejemplo, considere un objeto situado entre el centro de curvatura y el foco. b) Explique las diferencias entre imagen virtual e imagen real. Razone si puede formarse una imagen real con un espejo convexo.